



Autoreferat
Tomografia elektrooporowa jako narzędzie
rozwiązywania problemów badawczych
z zakresu geomorfologii

Marek Kasprzak

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko

Marek Kasprzak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2010 r. – doktor nauk o Ziemi w zakresie geografii (specjalność: Geomorfologia), Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego.

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Rozmieszczenie stref erozji i akumulacji podczas fluwialnych zdarzeń ekstremalnych na wybranych rzekach Sudetów Zachodnich”, promotor: prof. dr hab. Piotr Migoń, recenzenci: prof. dr hab. Kazimierz Klimek, prof. dr hab. Zbigniew Zwoliński.

2004 r. – magister geografii (specjalność: geografia fizyczna – geomorfologia), Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

od 2015 r. – adiunkt, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski

2013–2015 r. – specjalista, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski

2010–2013 r. – samodzielny geograf, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski

4. Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) przedstawiam cykl siedmiu publikacji naukowych powiązanych tematycznie pod zbiorczym tytułem:

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Tomografia elektrooporowa jako narzędzie rozwiązywania problemów badawczych z zakresu geomorfologii

b) publikacje naukowe wchodzące w cykl tematyczny

Osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego, zostało zawarte w zbiorze siedmiu oryginalnych anglojęzycznych artykułów naukowych, znajdujących się w części „A” wykazu czasopism Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego wymienionych poniżej:

- A1. **Kasprzak M.**, Strzelecki M.C., Traczyk A., Kondracka M., Lim M., Migala K., 2017, On the potential for a bottom active layer below coastal permafrost: the impact of seawater on permafrost degradation imaged by electrical resistivity tomography (Hornsund, SW Spitsbergen). *Geomorphology* 293, part B, 347–359, doi:10.1016/j.geomorph.2016.06.013.

Wskaźniki bibliometryczne	5 Year Impact Factor: 3,851	MNiSW: 35
Liczba cytowań	Web of Science: 9	Google Scholar: 8
Mój wkład w przygotowanie artykułu (55 %) obejmował: (1) opracowanie koncepcji badań, hipotezy, analiz i końcowych tez, (2) projektowanie pomiarów terenowych i ich fizyczne wykonanie podczas wypraw polarnych w latach 2012 i 2014, (3) przetwarzanie i analizę danych pomiarowych, (4) napisanie tekstu artykułu, (5) opracowanie 8 z 10 rycin, (6) edycję manuskryptu i odpowiedzi na recenzje.		

- A2. Strzelecki M., **Kasprzak M.**, Lim M., Świrad Z.M., Jaskólski M., Pawłowski Ł., Modzel P., 2017, Cryo-conditioned rocky coast systems: A case study from Wilczekodden, Svalbard. *Science of The Total Environment* 607–608, 443–453, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.009.

Wskaźniki bibliometryczne	5 Year Impact Factor: 4,984	MNiSW: 40
Liczba cytowań	Web of Science: 3	Google Scholar: 4
Mój wkład w przygotowanie artykułu (20 %) obejmował: (1) zaplanowanie i przeprowadzenie pomiarów elektrooporowych, (2) przetwarzanie i analizę danych pomiarowych, (3) napisanie części artykułu poświęconych pomiarom elektrooporowym, (4) wprowadzenie koncepcji kształtu permafrostu zgodnej z uzyskanymi wynikami do schematu funkcjonowania wybrzeża skalnego, (5) wykonanie 2 z 9 ilustracji, (6) poprawę manuskryptu i odpowiedzi na recenzje w częściach dotyczących pomiarów elektrooporowych.		

- A3. **Kasprzak M.**, 2015, High-resolution electrical resistivity tomography applied to patterned ground, Wedel Jarlsberg Land, south-west Spitsbergen, *Polar Research* 34, 25678, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v34.25678>

Wskaźniki bibliometryczne	5 Year Impact Factor: 1,892	MNiSW: 25
Liczba cytowań	Web of Science: 7	Google Scholar: 10

- A4. **Kasprzak M.**, Sobczyk A., 2017, Searching for the void: improving cave detection accuracy by multi-faceted geophysical survey reconciled with LiDAR DTM. Zeitschrift für Geomorphologie Supplementary Issues, 61/2, 54–59, doi:10.1127/zfg_suppl/2017/0327.

Wskaźniki bibliometryczne	5 Year Impact Factor: 1,173	MNiSW: 15
Liczba cytowań	Web of Science: 1	Google Scholar: 1
Mój wkład w przygotowanie artykułu (60 %) obejmował: (1) opracowanie koncepcji pracy, (2) zdobycie środków finansowych na badania terenowe i uzyskanie odpowiednich pozwoleń, (3) zaplanowanie i przeprowadzenie wraz ze współautorem wszystkich pomiarów terenowych, (4) Przetwarzanie i analiza danych ERT, (5) Zestawienie rozpoznanych pustek krasowych z sytuacją topograficzną (tabela w artykule), (6) współautorstwo tekstu i jego późniejsza edycja po recenzjach, (7) opracowanie 5 z 7 rycin.		

- A5. **Kasprzak M.**, Duszyński F., Jancewicz K., Michniewicz A., Różycka M., Migoń P., 2016, Rogowiec Landslide Complex (Central Sudetes, SW Poland) – the case of a collapsed mountain. Geological Quarterly, 60 (3), 695–713, doi: 10.7306/gq.1286

Wskaźniki bibliometryczne:	5 Year Impact Factor: 1,111	MNiSW: 20
Liczba cytowań	Web of Science: 6	Google Scholar: 8
Mój wkład w przygotowanie artykułu (25%) obejmował: (1) organizację i przeprowadzenie pomiarów elektrooporowych, (2) analizę i interpretację uzyskanych wyników pomiarowych, (3) napisanie części artykułu poświęconych ERT, (4) opracowanie 2 z 13 rycin.		

- A6. Duszyński F., Jancewicz K., **Kasprzak M.**, Migoń P., 2017, The role of landslides in downslope transport of caprock-derived boulders in sedimentary tablelands, Stołowe Mts, SW Poland. Geomorphology 295, 84–101, doi:10.1016/j.geomorph.2017.06.016

Wskaźniki bibliometryczne:	5 Year Impact Factor: 3,851	MNiSW: 35
Liczba cytowań	Web of Science: 3	Google Scholar: 9
Mój wkład w przygotowanie artykułu (20%) obejmował: (1) przeprowadzenie pomiarów elektrooporowych, (2) Analizę i interpretację uzyskanych wyników pomiarowych, (3) napisanie części artykułu poświęconych ERT, (4) zestawienie informacji wynikających z pomiarów ERT (tabela), (5) opracowanie 1 z 12 rycin.		

- A7. **Kasprzak M.**, Traczyk A., 2014, LiDAR and 2D Electrical Resistivity Tomography as a Supplement of Geomorphological Investigations in Urban Areas: a Case Study from the City of Wrocław (SW Poland), Pure and Applied Geophysics, 171, 6, 835–855. DOI 10.1007/s00024-013-0693-7.

Wskaźniki bibliometryczne:	5 Year Impact Factor: 1,771	MNiSW: 25
Liczba cytowań	Web of Science: 3	Google Scholar: 8
Mój wkład w przygotowanie artykułu (60 %) obejmował:		

(1) stworzenie koncepcji pracy, (2) organizację i wykonanie pomiarów terenowych, (3) analizy przestrzenne w środowisku GIS wraz ze współautorem, (4) stworzenie tekstu wraz ze współautorem, (5) opracowanie 8 z 10 rycin, (6) edycja tekstu i odpowiedzi po uwagach recenzentów.

Sumaryczny IF osiągnięcia naukowego:	18,633
---	---------------

Sumaryczna liczba punktów w punktacji MNiSW:	195
---	------------

c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wprowadzenie

Tomografia elektrooporowa (ang. *Electrical Resistivity Tomography* – ERT) jest jedną z metod geofizycznych. Służy obrazowaniu cech geoelektrycznych podłoża (oporności elektrycznej) w celu rozpoznania budowy geologicznej. Jest chętnie wykorzystywana w trakcie badań geotechnicznych, dostarczając informacji o cechach gruntów przeznaczonych pod zabudowę, hydrogeologicznych, w określaniu zasobów wodnych czy ich zanieczyszczenia, wreszcie w poszukiwaniu surowców czy pogrzebanych obiektów. W ostatnich latach zauważyć można trend, że wykorzystanie ERT nie ogranicza się już do badań związanych ściśle z zadaniami geologii, ale służy w zasadzie rozpoznaniu gruntu w szeroko rozumianych badaniach środowiska, wspierając prace geoarcheologiczne, gruntoznawcze, geomorfologiczne i inne (Samouëlian et al., 2005, Schrott and Sass, 2008, Van Dam, 2012, Loke et al., 2013).

Prowadzone przez autora badania były oparte o hipotezę roboczą mówiącą, że konsekwentne zastosowanie tomografii elektrooporowej, w powiązaniu z innymi źródłami danych o charakterze komplementarnym i weryfikującym, pozwoli na rozwiązanie istotnych problemów geomorfologicznych dotyczących różnych środowisk morfogenetycznych (litoralnego, peryglacialnego, krasowego, denudacyjnego, fluwialnego). Do problemów tych należą przestrzenne zróżnicowanie reakcji przemarznętego gruntu na bliskość wody morskiej, głębna struktura podłoża pod gruntami strukturalnymi – typowymi strukturami gruntu z warstwą aktywną, obecność pustek krasowych i możliwości ich nieinwazyjnego wykrywania, określanie głębokiej struktury osuwisk oraz rozpoznania form fluwialnych przykrytych młodszymi osadami na obszarze miasta. Metoda elektrooporowa jest więc wspólnym mianownikiem zbioru prac składających się na osiągnięcie naukowe, a istotną jego częścią jest aspekt metodyczny. Przeprowadzenie badań w różnych kontekstach geomorfologicznych na obszarach polarnych (Spitsbergen), górskich (Sudety) i nizinnych (dolina Odry), pozwoliło na wskazanie potencjalnych źródeł nieścisłości w interpretacjach i określenie pola niepewności interpretacyjnej.

Uzyskane wyniki badań wnoszą do geomorfologii nowe informacje, które można podzielić na dwie kategorie. Są to (i) zobrazowanie procesów rzeźbotwórczych, form i osadów skrytych pod współczesną powierzchnią terenu oraz cech termicznych podłoża, a także (ii) oryginalne podejście do prowadzenia pomiarów ERT, polegające na zastosowaniu dużej rozdzielczości pomiaru czy przestrzennego zespolenia obrazowania geofizycznego z numerycznymi modelami terenu (NMT) LiDAR, dziś już niemal podstawowymi źródłami wiedzy o ukształtowaniu powierzchni.

Prezentowane wyniki pomiarów elektrooporowych są oryginalnym osiągnięciem naukowym i odkrywają nieznane wcześniej informacji dotyczące uwarunkowań rzeźby terenu. Znacząco poszerzają naszą wiedzę zarówno o odpowiednim obiekcie badań geomorfologicznych, jak i perspektywach i ograniczeniach w stosowaniu metody elektrooporowej. Wyniki te będą omówione w osobnych podrozdziałach po części wstępnej, prezentującej w sposób syntetyczny teorię dotyczącą pomiarów elektrooporowych.

Podstawowe założenia i rozwój badań elektrooporowych

Rozpoznanie płytkiej budowy geologicznej przy pomocy pomiarów elektrooporowych gruntu nie jest nową metodą badawczą. Technika ta została zastosowana po raz pierwszy ponad 100 lat temu przez profesora paryskiej uczelni górniczej (École nationale supérieure des mines de Paris) Conrada Schlumbergera (Meunier 2012). Istotą pomiarów elektrooporowych jest wprowadzenie do podłoża prądu elektrycznego za pośrednictwem dwóch elektrod zasilających (C_1 , C_2) oraz pomiar różnicy napięć przy użyciu dwóch innych, wbitych w grunt elektrod pomiarowych (P_1 , P_2). Znając natężenie prądu przechodzącego przez linię zasilającą oraz różnicę potencjałów elektrod pomiarowych, możliwe jest wyliczenie oporu elektrycznego w danym punkcie, korzystając z prawa Ohma: $R = U / I$, gdzie R – opór przewodnika elektrycznego, U – napięcie między końcami przewodnika, I – natężenie prądu elektrycznego (Loke 2013). Ponieważ badany ośrodek skalny z reguły nie jest ciałem jednorodnym, pomiar wyznacza oporność pozorną – wartość uśrednioną, wynikającą z rozkładu oporności właściwej badanego podłoża: $\rho_a = k (\Delta U_{P_1P_2} / I_{C_1C_2})$, gdzie ρ_a – oporność pozorna [$\Omega \cdot m$], $\Delta U_{P_1P_2}$ – różnica potencjałów między elektrodami pomiarowymi P_1 i P_2 , $I_{C_1C_2}$ – natężenie prądu emitowanego w podłoże przez elektrody C_1 i C_2 , k – współczynnik geometryczny układu pomiarowego, zależny od rozstawu elektrod (np. w układach Wennera, Schlumbergera, dipolowo-osiowym i in.).

Badania elektrooporowe gruntu mogą być stosowane w trzech podstawowych wariantach: (i) sondowaniu (VES), polegającym na powtarzaniu pomiarów przy kolejnym zwiększaniu odstępów między elektrodami, (ii) profilowaniu (EP), podczas którego czteroelektrodowy układ pomiarowy przemieszcza się wzdłuż linii profilowej bez zmiany odstępów między elektrodami oraz (iii) tomografii, która łączy dwie techniki opisane powyżej dzięki użyciu większej ilości elektrod umieszczonych w gruncie. W rezultacie otrzymuje się wyniki pomiarów odpowiadających punktom rozłożonym pionowo (i), tworzących jeden ciąg pod

powierzchnią terenu (ii) lub kilka takich równoległych do siebie ciągów pod powierzchnią terenu (iii). Rezultat pomiarów poddany zostaje inwersji geofizycznej, polegającej na poszukiwaniu najlepszego dopasowania modelu propagacji linii pola elektrycznego do otrzymanych wartości. Proces inwersyjny polega na obliczeniu zagadnienia prostego w kolejnych iteracjach z założeniem minimalizacji błędu dopasowania. Osiągnięciem ostatnich dekad jest automatyzacja zarówno samych pomiarów, jak i obliczeń. Konstrukcja aparatury uwalnia użytkownika od konieczności analogowych odczytów woltomierza, a odpowiednie oprogramowanie (np. RES2DINV – Geotomo, Malezja) pozwala na prowadzenie inwersji geofizycznej, i zobrazowanie graficzne wyników, uwzględniając zmiany parametrów modelowania czy poprawkę topograficzną wynikającą z prowadzenia pomiarów po podłożu o urozmaiconej rzeźbie terenu. Przestrzenne położenie profilu pomiarowego można określić przy pomocy odbiornika GPS.

A1. Oddziaływanie morza na permafrost w strefie brzegowej SW Spitsbergenu

Osiągnięciem naukowym uzyskanym dzięki zastosowaniu metody elektrooporowej jest rozpoznanie cech permafrostu¹ na SE wybrzeżu Spitsbergenu. Mimo wieloletnich badań zmarzliny na Svalbardzie, stosowana wcześniej metodyka nie przyniosła odpowiedzi na podstawowe problemy dotyczące strefy kontaktu wód morskich i lądu, czego dowodem są m.in. niepełne schematy krążenia wód gruntowych w permafroście (Ploeg et al. 2012). Głębokie wiercenia lokalizowano z dala od morza (Etzelmüller et al. 2011), a inne odwierty w strefie brzegowej były zbyt płytkie (Chmal et al. 1988). Także rozpoznanie warstwy czynnej, prowadzone metodami tradycyjnymi, nie mogło dostarczyć pełnego obrazu przestrzennego tego zjawiska.

W takich okolicznościach metodę elektrooporową wykorzystano do zobrazowania permafrostu na wybranych, niezlodzonych odcinkach wybrzeża Ziemi Wedela Jarlsberga. Celem badań było sprawdzenie miąższości permafrostu w tej strefie oraz jego warstwy czynnej w okresach ablacyjnych (letnich). Po pilotażowych badaniach przeprowadzonych w lipcu 2012 r. postawiono hipotezę, że permafrost lądowy w strefie wybrzeża znajduje się pod wpływem podziemnego strumienia ciepła od strony wód morskich, ogrzewających się latem do temperatur dodatnich. Podłoże w tej części lądu może być także poddane migracji wód podziemnych od strony morza o podwyższonym zasoleniu, jak stwierdza się to powszechnie w innych rejonach świata (np. Mylroie i Carew 2003, Martínez et al. 2009, Morrow 2010). Podwyższenie mineralizacji powinno skutkować przesunięciem punktu zamarzania w kierunku temperatur ujemnych.

Przedstawiona hipoteza mogłaby tłumaczyć zjawisko opisane przez Baranowskiego (1968) w Hornsundzie, polegające na okresowym, śródzimowym ogrzewaniu spodnich warstw gruntu, stwierdzonym w monitorowanym termicznie odwiercie. Niestety badania Baranowskiego nie

¹ Permafrost definiowany jest jako stan termiczny podłoża, polegający na jego trwałym (co najmniej dwuletnim) przemarznięciu (Dobiński 2011).

były korelowane z obserwacjami zlodzenia morza, co mogłoby tłumaczyć nieregularny dopływ ciepła stwierdzany w profilu termicznym.

Metoda elektrooporowa jest najlepszą z możliwych metod obrazowania geofizycznego, jaką można było dobrać do weryfikacji postawionej hipotezy. Wynika to z faktu, że przepływ prądu elektrycznego jest uzależniony od termiki podłoża, a ciała (skały) schłodzone do temperatury $t \leq 0$ °C tracą własności umożliwiające przewodzenie prądu elektrycznego (Kneisel i Hauck 2008). Oznacza to, że w efekcie pomiarów elektrooporowych stwierdza się drastyczny wzrost oporności przemrożonego ośrodka skalnego. Choć nie istnieje jedna graniczna wartość, od której można stwierdzić przemarznięcie skały, otrzymanie wartości pomiarowej rzędu $\rho \geq 10$ k Ω .m silnie sugeruje ujemną temperaturę ośrodka skalnego. Co prawda tak duże wartości oporności elektrycznej są cechą także niektórych skał krystalicznych (Reynolds 2011), jednak w przypadku permafrostu stwierdza się z reguły wartości znacznie większe, przekraczające 100 k Ω .m i dążące do nieskończoności (brak przewodności elektrycznej).

Warunkiem poprawnej interpretacji pomiarów elektrooporowych w aspekcie termiki podłoża jest dobre rozpoznanie geologiczne lub, jeszcze lepiej, prowadzenie pomiarów na homogenicznym pod względem litologii obszarze. W takich miejscach planowane też były pomiary elektrooporowe. Wykonywano je przy przylądku Sæterdalsneset i w zatokach Hyttevika oraz Steinvika, na obszarze zbudowanym z kwarcytów oraz przy Zatoce Veslebogen na podłożu marmurów. Profile elektrooporowe prowadzono po powierzchni wyniesionych teras morskich, prostopadle do strefy brzegowej, podczas odpływów, rozpoczynając je od miejsca zwilżenia powierzchni wodą morską. W pomiarach stosowano układ elektrod Wenner-Schlumberger, uważany za stosunkowo uniwersalny w wykrywaniu zarówno pionowych, jak i poziomych struktur podłoża (Reynolds 2011). Wykonywano długie profile (315 m) z rozstępem elektrod co 5 m dla ogólnego rozpoznania podłoża, a także krótsze profile (71 m i 142.5 m) z rozstępem elektrod co 1 lub 1,5 m dla bardziej szczegółowego rozpoznania sytuacji. Umożliwiały one jednocześnie uchwycenie warstwy czynnej permafrostu. Przy Zatoce Veslebogen zaplanowane profile miały dodatkowo obrazować różnice w przemarznięciu podłoża na skalnym półwyspie eksponowanym na działanie morza i we wnętrzu zatoki, mniej eksponowanym na oddziaływanie wód morskich. Pomiary prowadzone były w sezonach letnich 2012 oraz 2014. Powtarzanie pomiarów o większej rozdzielczości, a więc wykonanie time-lapse'u, było podstawą do określenia zmian zachodzących w podłożu w różnych momentach sezonu ablacyjnego (od początku lipca do końca sierpnia).

Uzyskane modele inwersyjne, powstałe po przetworzeniu danych pomiarowych, pozwoliły na wysunięcie kilku istotnych wniosków, które w aspekcie rozpoznania permafrostu na SE wybrzeżu Spitsbergenu mają charakter przełomowy. (1) Pomiary ERT powtarzane cyklicznie wskazują na istnienie drugiej, spodniej warstwy czynnej permafrostu, zależnej od ciepłoty i zasolenia wód morskich oddziałujących na wnętrze lądu. Udokumentowane zjawisko jest

skrajnie odmienne od lepiej rozpoznanych sytuacji w delcie rzeki McKenzie (MacKay 1972) czy na północnych wybrzeżach Syberii (Overduin et al. 2016). (2) Bardzo niskie oporności podłoża w strefie brzegu odsłoniętej w czasie odpływu ($\rho < 100 \Omega.m$) w zasadzie wykluczają istnienie podmorskiego permafrostu, którego istnienie postulowali pierwsi badacze tego obszaru (Werenskiold 1922), przynajmniej w płytkim położeniu. (3) Niskie oporności elektryczne podłoża zapadają pod powierzchnię terenu i kontynuują się w głąb lądu. Na badanych stanowiskach faktu tego nie można wytłumaczyć zmiennością litologiczną. Sytuacja dowodzi silnego oddziaływania wody morskiej (jej temperatury i zasolenia) na lądową część strefy brzegowej i tym samym spąg permafrostu. (4) Zasięg takiego oddziaływania wody morskiej powoduje, że permafrost na lądzie ma postać klina skierowanego ostrym końcem się w kierunku morza. (5) Na rozwinięcie permafrostu w strefie brzegowej i oddziaływanie na niego wód morskich wpływ ma konfiguracja wybrzeża. (5) Duża rozdzielczość pomiarów elektrooporowych – małe odstępstwa między elektrodami – umożliwiły interpretację miąższości warstwy czynnej permafrostu oraz wykrycie zmian w jego strukturze – przy samym brzegu morskim ma on małą miąższość i może być nieciągły.

Bezpośrednim dowodem na prezentowane tezy mogą być planowane w przyszłości pomiary termiczne w odpowiednio zaplanowanych odwiertach. Obecnie, przy braku jednoznacznych dowodów (pomiarów) temperaturowych należy zastrzec, że efekt „niezamarnięcia” może być jedynie stanem kriotycznym podłoża – obecność słonej wody w gruncie może ograniczać rozwój lodu gruntowego mimo ujemnej temperatury podłoża.

A2. Kształt permafrostu na wybrzeżu skalistym – przykład Przylądka Wilczka

Rozszerzeniem osiągnięcia przedstawionego w punkcie A1 były badania nad funkcjonowaniem skalistych fragmentów wybrzeży Spitsbergenu. Na podstawie uzyskanych wcześniej wyników założono, że permafrost na skalnych przylądkach Svalbardu może mieć niewielką miąższość i formę (kształt) silnie uzależniony od oddziaływania morza. Do weryfikacji tej hipotezy wybrano Przylądek Wilczka (norw. *Wilczekodden*), który ze względu na swoje położenie i rozmiary doskonale nadawał się przeprowadzenia pomiarów elektrooporowych. Przylądek ten oddziela zatoki Isbjørnhamna i Hansbukta w Hornsundzie. Klify oraz platforma abrazyjna wokół przylądka poddane zostały kompleksowym pomiarom stopnia zwietrzenia przy pomocy młotka Schmidta oraz mikroerozjometru i posłużyły do wyjaśnienia różnic w stopniu zwietrzenia 5 odrębnych stref w profilu wysokościowym skalnego wybrzeża (*cliff top*, *cliff face*, *cliff toe*, *high tide platform*, *intertidal platform*). Zadaniem pomiarów ERT było natomiast wskazanie stanu termicznego podłoża, wykorzystując opisane wyżej zależności, zgodnie z którym przemarnięcie skał prowadzi do drastycznego obniżenia przewodzenia przez nie prądu elektrycznego. Po wcześniejszych próbach, pomiary zaplanowano w profilu prowadzącym zgodnie z osią półwyspu oraz trzech profilach w poprzek półwyspu, w przybliżeniu prostopadłych do profilu pierwszego. W pomiarach posługiwano się metodą Wenner-Schlumberger i stosowano 5 m odstępstwa między

elektrodami. Najdłuższy z profili o długości 555 m wykonywany był techniką *roll-along* (przedłużanie profilu przez przekładanie kabli pomiarowych).

Wyniki pomiarów poddane zostały inwersji geofizycznej (L1) w programie RES2DINV i zestawione w jednolitej logarytmicznej skali barwnej. Dwuwymiarowe obrazowanie elektrooporowe przekształcono także do postaci trójwymiarowej w programie ArcGIS. Dla jednoznacznej orientacji przestrzennej profile zestawiono z numerycznym modelem terenu (NMT), otrzymanym dzięki wcześniejszemu skanowaniu powierzchni przyłądka naziemnym skanerem laserowym. Tego typu trójwymiarowy model inwersyjny, połączony ze szczegółowym NMT, był pierwszym tego typu sposobem obrazowania geofizycznego permafrostu.

Otrzymane modele inwersyjne wykazały silny kontrast pod względem cech geoelektrycznych podłoża skalnego, nie mający bezpośredniego związku z przebiegającą tu granicą litologiczną (Czerny et al. 1992) dzielącą przyładek na część wykształconą z łupków (północno-wschodnia część) i marmurów (część południowo-zachodnia). W obrazie tym wyróżnia się zwarte ciało skalne o niezwykle wysokiej oporności elektrycznej ($\rho > 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$) znajdujące się przy powierzchni przyłądka. Jego miąższość jest niewielka w części dystalnej półwyspu i sięga od przeciętnego poziomu wody do powierzchni terenu (ok. 5–7 m). W części proksymalnej przyłądka miąższość ciała skalnego o bardzo wysokich opornościach rośnie do ok. 30–40 m. Przestrzenny rozkład tych wartości można jednoznacznie interpretować jako zasięg permafrostu. Zastosowana rozdzielczość pomiaru jest niska i pierwszy horyzont punktów pomiarowych znajduje się na głębokości 2,5 m. Nie pozwala to na dobre odwzorowanie przypowierzchniowej warstwy czynnej permafrostu. Mimo to przy powierzchni przyłądka w wielu miejscach oporności podłoża maleją ($\rho < 1 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$), wskazując jednoznacznie na rozmarznięcie tych stref. Było to weryfikowane przez odczyty termistorów umieszczonych w otworach wiertniczych (2–5 m głębokości) ulokowanych w takim miejscu. Duża miąższość warstwy czynnej jest charakterystyczna dla wychodni litych skał. Uzyskane wyniki wskazują na silne oddziaływanie morza na permafrost w strefie skalistych wybrzeży Spitsbergenu. Wybrany przykład dowodzi, że termika morza oraz jego zasolenie uniemożliwiają rozwinięcie permafrostu poniżej linii wody w wysuniętych częściach skalnych przyładków.

A3. Wykształcenie gruntów strukturalnych i ich wpływ na strop permafrostu

Podjęte badania dotyczyły gruntów strukturalnych, występujących w różnych strefach klimatycznych, ale powszechnie kojarzonych ze strefą peryglacjalną i obszarami wolnymi od lodu w Arktyce, Antarktyce lub terenach górskich i wyżynnych. Grunty strukturalne są z reguły klasyfikowane ze względu na wzór formujący się na powierzchni terenu i sortowanie cząstek mineralnych (Washburn 1956). Rzadkie są natomiast przykłady ich rozwinięcia pionowego (Washburn 1969), co wynika z oczywistych trudności w tworzeniu odpowiednich odsłonień. Sytuacja ta może mieć wpływ na ciągły niedostatek wiedzy w zakresie mechanizmów formowania się gruntów strukturalnych. Aktualnie dominują trzy grupy teorii

wyjaśniających sortowanie materiału zwietrzelinowego (Ballantyne 2007). Proces ten może wynikać z pęcznienia mrozowego, cyrkulacji wynikającej z różnic gęstościowych oraz swobodnej konwekcji wód porowych podczas rozmarzania gruntu. Podobnym, otwartym wciąż polem do rozważań pozostaje relacja między strukturą podłoża a kształtem stropu permafrostu.

Wymienione problemy badawcze były przesłanką do podjęcia pracy nad zobrażowaniem elektrooporowym przekrojów przez różne rodzaje gruntów strukturalnych. Prace terenowe przeprowadzono w lipcu 2012 r. na Ziemi Wedela Jarlsberga na SW Spitsbergenie. Stanowiska badawcze założono na sortowanych wieńcach kamienistych, poligonach bez widocznego sortowania oraz pasach kamienistych z oznakami sortowania. Wybór stanowisk podyktowany był także koniecznością wystarczająco dobrego uziemienia w podłożu elektrod wykorzystywanych w pomiarach. Stanowiska znajdowały się przy brzegu jeziora Myrktjørna w dolinie Brattegg oraz na wyniesionych terasach morskich u podnóża masywu Kvartsittknattane. Najważniejszym aspektem prowadzonych pomiarów było zastosowanie bardzo małych odstępów między elektrodami w profilach pomiarowych (0,3 lub 0,8 m). Taka metodyka była w czasie prowadzenia pracy badawczej unikalna i prezentowana wcześniej wyłącznie przy badaniach ścian zabytków kamiennych (Saas i Viles 2010) bądź badania betonu (Karhunen 2013). Stosowanie małych odstępów między elektrodami miało na celu zapewnienie odpowiednio dużej rozdzielczości wynikowych modeli inwersyjnych. Pomiary prowadzone były w profilach przy użyciu układów dipol-dipol. Zapewniało to głębszą penetrację oraz większą ilość punktów pomiarowych w porównaniu do innych stosowanych układów elektrod (Reynolds 2011, Loke 2013). Pomiary innymi układami elektrod były jednak dodatkowo wykonywane w celu porównania otrzymanych wyników. Rezultaty pomiarów, przetwarzane w programie RES2DINV, poddano standardowej inwersji (L1), jak i tzw. inwersji „robust” (L2), która zmniejsza niepożądany szum wynikający z niedoskonałości pomiaru i jest przydatna do obrazowania gwałtownych zmian oporności podłoża (Loke 2013).

Mimo trudności w odpowiednim uziemieniu elektrod, obrazowanie elektrooporowe gruntów strukturalnych powiodło się. Na wynikowych modelach inwersyjnych podłoża wykazuje silne kontrasty pod względem cech geoelektrycznych, co odpowiada zróżnicowaniu struktury i tekstury osadów oraz ich nasyceniu wodą. W przypadku wieńców kamienistych większe elementy skalne (otoczaki, gruz) wraz z pustkami powietrznymi między nimi obrazowane są przez wysokie oporności. Wilgotny materiał drobnoziarnisty tworzy ciała o niskich opornościach ($\rho < 50 \Omega \cdot m$). W przekrojach przez niesortowane poligony zaznacza się przypowierzchniowa warstwa o wyższej oporności zalegająca na utworach o oporności niższych. Niskie oporności tworzą także pionowe struktury odpowiadające szczelinom między poligonami. Otoczaki na wyniesionej terasie morskiej, uformowane w postaci kamienistych pasów również wykazują podobne zróżnicowanie pod względem oporności elektrycznej. Wysokie wartości oporności wynikają z obecności pustek między otoczkami, wypełnionych powietrzem i są charakterystyczne dla wypukłych mikroform terenu. Pod tą warstwą znajduje się strefa o niższych opornościach, formująca oddzielne komórki również

nawiązujące kształtem do ukształtowania powierzchni terenu. Wszystkie wykonane modele inwersyjne mają jeszcze jeden, wyraźnie oddzielony od reszty profilu dolny poziom o maksymalnie wysokiej oporności (0,8–1 k Ω .m i więcej). To nagłe osłabienie lub wręcz zaprzestanie przewodzenia prądu elektrycznego w podłożu wynika z obecności lodu gruntowego. Granicę wyznacza strop permafrostu. W każdym z badanych profili kształt stropu permafrostu nawiązywał do zróżnicowania struktury podłoża i układu osadu na powierzchni terenu. Najlepiej widoczne jest to w przypadku gruntów wykazujących sortowanie, gdzie grunt odmarza głębiej w obecności utworów grubofrakcyjnych a płycej pod utworami drobnofrakcyjnymi. Potwierdza to tym samym pionierskie obserwacje Jahna (Jahn 1948). Strop permafrostu pod gruntami strukturalnymi ma więc w przekroju kształt falisty. Rozpatrując ten przypadek trójwymiarowo w nawiązaniu do rozmieszczenia wieńców kamienistych, strop permafrostu przyjmuje formę sieci kopuł. W badanym okresie rozmarzanie podłoża (warstwa czynna permafrostu) sięgało od 0,5 do 2 m p.p.t.

Wykonane badania udowodniły, że bez względu na zastosowany układ pomiarowy oraz przyjętą metodę inwersji geofizycznej (L1 lub L2), obrazowanie elektrooporowe pozwala na jednoznaczne wyróżnienie stropu permafrostu i jego kształtu. W procedurze tej istotne są obserwacje skokowych różnic oporności elektrycznej, a nie same wartości pomiaru, które różnią się w przypadku stosowania odmiennych metod pomiarowych. Mimo to, występowanie ośrodka skalnego o oporności $\rho > 1$ k Ω .m może sugerować jego przemarznięcie. Bliskie położenie elektrod podczas pomiarów ERT umożliwia badanie nawet drobnych struktur sedimentacyjnych.

A4. Pustki krasowe – inny aspekt ekstremalnie wysokich oporności elektrycznych podłoża

Prezentowane wyżej badania dotyczyły obrazowania elektrooporowego ciał skalnych o ekstremalnie wysokich opornościach powodowanych obecnością lodu gruntowego. Innym ciałem o ekstremalnie wysokiej oporności (opornikiem) spotykanym w podłożu są pustki wypełnione powietrzem. Dlatego podjęto badania mające na celu wykrycie anomalii wysokooporowych w obszarze krasowym, znanym z występowania pustek jaskiniowych. Obszarem takim są okolice Jaskini Niedźwiedziej w Masywie Śnieżnika (Sudety Wschodnie), gdzie w latach 2012–2014 dokonano spektakularnych odkryć nowych korytarzy i komór jaskiniowych. W efekcie trudnej technicznie eksploracji nierozpoznanych wcześniej przejść, speleolodzy donieśli o istnieniu korytarzy oraz dobrze rozwiniętych studni krasowych o imponujących jak na warunki sudeckie rozmiarach i szacie naciekowej (Sobczyk et al. 2016). Pojawiła się więc również unikatowa szansa weryfikacji wyników badań elektrooporowych.

Marmury, w których rozwinęła się Jaskinia Niedźwiedzia, udokumentowane są na mapach geologicznych (Teisseyre 1973, Don et al. 2003) jako wydłużona soczewka z wychodnią wzdłuż doliny rzeki Kleśnicy i otoczoną łupkami łyszczykowymi i paragnejkami na stoku Góry Stromej. Istnieją przesłanki natury hydrogeologicznej (Ciężkowski i Madera 1985), że

znajdujący się tutaj system krasowy jest znacznie większy, być może przecinający nawet cały Masyw Śnieżnika w kierunku południowym.

Prowadzone wcześniej na tym obszarze prace geofizyczne, w tym sondowania elektrooporowe (Jodłowski 1989) oraz pomiary georadarowe (Szynkiewicz 2012), nie przyniosły bezpośrednich odkryć nowych pustek krasowych. W tej sytuacji zaplanowano kampanię pomiarową ERT. W pierwszym etapie prac pomiary prowadzono po stoku nad pustkami krasowymi o znanej lokalizacji, by potwierdzić przydatność metody oraz potwierdzić jednoznaczność otrzymywanych wyników. W drugim etapie prac profile wyznaczono w strefach, gdzie podziemna eksploracja jeszcze nie dotarła. Pomiary prowadzono, stosując rozstęp między elektrodami co 5 m, używając metody Wenner-Schlumberger oraz w razie potrzeby, przedłużając profile przy pomocy techniki *roll-along*. Przed wyborem przebiegu profilów stok poddano gęstemu profilowaniu georadarowemu (GPR) przy pomocy anten 250 oraz 52 MHz z zamiarem wykrycia pustek znajdujących się blisko powierzchni terenu. Podczas planowania prac korzystano z materiałów kartograficznych wytworzonych przez speleologów (opracowanych przez S. Kostkę). W czasie prac terenowych dokonano także rewizji istniejących danych na temat ukształtowania powierzchni terenu. Wspomagała je analiza NMT wytworzonego z danych LiDAR.

Już pierwsze przeprowadzone pomiary dowiodły przydatności metody elektrooporowej. Wyniki otrzymane z GPR były mniej jednoznaczne i zakłócone silnym odbiciem fali elektromagnetycznej od granicy między zwietrzeliną i litą skałą. W metodzie ERT pustki krasowe manifestowały się jako pola o oporności ekstremalnie wysokiej ($\rho > 50 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$, dążącej do nieskończoności). Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było niemal jednoznacznie zidentyfikowanie znanych, nazwanych korytarzy i sal Jaskini Niedźwiedziej. Modele inwersyjne pozwoliły także na rozróżnienie skał krasowiejących od skał otoczenia (łupków), a co za tym idzie miąższości soczewy marmurów, także pod przykryciem osadów stokowych i we wnętrzu górotworu. Dodatkowym, niespotykanym wcześniej w literaturze zabiegiem, było zestawienie modeli inwersyjnych pokazujących pustki krasowe z danymi o ukształtowaniu powierzchni LiDAR NMT. Dane osadzone w układzie współrzędnych geodezyjnych (PUWG 1992, EPSG 2180) umożliwiły budowę modelu trójwymiarowego.

Uzyskane wyniki badań elektrooporowych pozwoliły na potwierdzenie, że ciągi jaskiniowe w Dolinie Kleśnicy rozwinęły się w trzech głównych horyzontach. Zobrazowano najlepiej poznane pustki krasowe istniejące wokół trasy udostępnionej do zwiedzania, nowoodkryte pustki wraz największymi salami, ale przede wszystkim potwierdzono istnienie dużych pustek krasowych na południe (w górę doliny Kleśnicy)², do których do tej pory speleolodzy nie dotarli. Analiza NMT pozwoliła ponadto na wykrycie drobnych różnic w nachyleniu zbocza doliny, za co odpowiedzialna jest wychodnia skał krasowiejących, a tym samym poprawić granice wykreślone we wcześniejszych materiałach geologicznych. Rozpoznanie struktury

² Dalszy etap rozpoznania pustek krasowych w dolinie Kleśnicy przy pomocy ERT przedstawiono w publikacji Sobczyk et al. (2016).

masywu umożliwia także określenie miąższości soczewy marmurów na co najmniej 80–100 m.

A5. Złożone mechanizmy ruchów masowych w Sudetach

Sudety do niedawna były postrzegane jako obszar, gdzie ślady osuwisk są nieliczne, zwłaszcza w porównaniu do pobliskich Karpat. Poglądy te uległy zmianie, gdy dzięki danym LiDAR możliwa stała się analiza ukształtowania powierzchni terenu na silnie zalesionych stokach. W ten sposób nie tylko odkrywano ślady osuwisk, ale rewizji ulegają także poglądy na frekwencję i zasięg osuwisk na obszarach, gdzie były wcześniej stwierdzane, np. w Górach Stołowych (Migoń i Kasprzak 2011) lub w Górach Kamiennych (Migoń et al. 2010).

Jednym z najrozleglejszych obszarów osuwiskowych w Sudetach jest masyw Rogowca w Górach Suchych (część G. Kamiennych). Lokalne kulminacje w tej części Sudetów zbudowane są z permskich skał wulkanicznych (trachyandezytów, riolitów, tufów riolitowych), zalegających na karbońskich i permskich skałach osadowych (gł. mułowcach, piaskowcach, zlepieńcach) (Awdankiewicz 1999). Odmienne cechy tych kompleksów skalnych – plastyczność skał osadowych poddanych naciskowi sztywnych, ale spękanych i przepuszczalnych skał wulkanicznych – a także duże nachylenie stoków, warunkowało w przeszłości działanie procesów osuwiskowych. Analiza NMT LiDAR pokazała, że deformacje stoków spowodowane ruchami masowymi zajmują w masywie Rogowca obszar ok. 40 ha. Rzeźbę osuwiskową reprezentują rowy grzbietowe, skarpy i jęzory osuwiskowe, powierzchnie o silnie urozmaiconej morfologii z pagórami i wcięciami erozyjnymi, zagłębienia bezodpływowe, nagromadzenia luźnego materiału klastycznego i inne. Stwierdzone niezgodności w układach spękań pozornych wychodni skalnych także wskazują na grawitacyjne przemieszczenie tych elementów.

Zaplanowane pomiary ERT miały dostarczyć informacji o strukturze podłoża geologicznego warunkującej stwierdzone ruchy masowe oraz wyjaśnić mechanizmy, jakie doprowadziły do stwierdzonych deformacji powierzchni stokowych. Pomiary wykonano, przecinając profilami strefę grzbietową oraz stoki o ekspozycji zachodniej na północny wschód od Rogowca. Wyboru miejsc pomiarowych dokonano na podstawie studiów NMT LiDAR. Pomiary prowadzono, stosując układ elektrod Wenner-Schlumberger z 5 m odstępami między elektrodami.

Wynikowe modele inwersyjne dobrze obrazują kontrast między skałami wulkanicznymi i skałami osadowymi. Spękane i porowate skały wulkaniczne wykazują wysoką oporność elektryczną ($\rho > 500 \Omega \cdot m$), podczas gdy skały osadowe oporności znacznie niższe. Profil pomiarowy poprowadzony w poprzek grzbietu udokumentował silne spękanie skał wulkanicznych. Tworzą one przy powierzchni terenu górną warstwę o miąższości 10–30 m, która jest wyraźnie porozdzielana na osobne bloki, pochylone zgodnie ze spadkiem terenu. Skały wulkaniczne dobrze manifestują się także na profilach prowadzonych po stoku. Na jednym z modeli, w górnej partii stoku, udokumentowano strefę wysokich oporności, której

spąg ma kształt przypominający rotacyjną strefę poślizgu osuwiskowego. Modele te pokazują także wyraźną, przypowierzchniową strefę o miąższości 5–10 m o odmiennych właściwościach geoelektrycznych od głębszego podłoża.

Interpretacja ukształtowania powierzchni terenu połączona z otrzymanymi rezultatami pomiarów geofizycznych prowadzi do wniosku, że masyw Rogowca jest poddany złożonym mechanizmom ruchów masowych. Obrazowanie ERT dowiodło, że kulminację masywu tworzy czapka sztywnych skał wulkanicznych (ang. *caprock*) które podlegają spękaniu i przemieszczeniu wskutek odkształcania leżących pod nimi uwilgotnionych i plastycznych skał osadowych. W ten sposób w strefie grzbietowej dochodzi do bocznego rozciągania nadkładu skał wulkanicznych (ang. *lateral spreading*) i ich dezintegracji (ang. *caprock disintegration*). Efektem tego są widoczne w morfologii terenu rowy grzbietowe. Na stromych stokach masywu działały procesy osuwiskowe zarówno o charakterze rotacyjnym, jak i translacyjnym. Transportowany w dół stoku materiał wypełnia dna okolicznych dolin i podlega procesom erozyjnym.

A6. Uwarunkowania ruchów masowych w obszarze o rzeźbie krawędziowej

Badaniami elektrooporowymi objęto wybrane stoki w Górach Stołowych. Masyw ten jest jedynym w Polsce przykładem rzeźby płytowej. Charakterystyczne dla tego obszaru stoliwa wytworzone są z kredowych piaskowców zalegających na skałach osadowych o mniejszej odporności na procesy denudacyjne (Wojewoda 1997). Wklęsłe stoki pokryte są tu powszechnie występującymi luźnymi blokami i głazami skalnymi, których źródłem są piaskowcowe urwiska. Zauważono, że przestrzenny zasięg bloków skalnych jest znacznie większy, niż wynikałoby to z możliwości transportu grawitacyjnego wskutek odpadania i obrywów ze znajdujących się powyżej ścian skalnych (Duszyński i Migoń 2015). W pozycji podstokowej elementy te mogą także tworzyć znacznej wielkości nagromadzenia.

Rozpoznanie płytkiej budowy geologicznej było krokiem do poznania mechanizmów potencjalnego ruchów pokryw stokowych. Po analizie NMT LiDAR założono, że jednym z takich mechanizmów mogą być osuwiska. Pomiary prowadzono więc głównie na obszarach, gdzie undulacja niższych odcinków powierzchni stokowych wskazywała na obecność utworów koluwalnych. Pomiary prowadzone na stromych, zalesionych stokach i podłożu utrudniającym niejednokrotnie dobre uziemienie dla elektrod (wolne przestrzenie między głazami) stanowiło wyzwanie techniczne. W pomiarach posługiwano się metodą Wenner-Schlumberger i stosowano odstępy między elektrodami co 5 m. Otrzymane modele inwersyjne, wobec ograniczonej użyteczności dostępnych map geologicznych i przy braku materiałów z wierceń (obszar chroniony Parku Narodowego Gór Stołowych) były analizowane z daleko posuniętą ostrożnością. Do analizy wybrano 8 spośród rozpoznanych stanowisk na stokach wszystkich stołowogórskich stoliw (Szczeliniec Mały, Szczeliniec Wielki, Skalniak, Spławy, Narożnik, Urwisko Batorowskie, Biała Skała, Zbrojownia Herkulesa). Prospekcja podłoża sięgała, w zależności od profilu, od 50 do 70 m pod powierzchnią terenu.

Spostrzeżenia i wnioski płynące z analizy otrzymanych profili ERT zostały zestawione w podziale na utwory zwietrzelinowe i skały głębszego podłoża. W drugim przypadku miały postać komentarza do rozpoznania geologicznego obszaru. Tutaj zaprezentowane zostaną jedynie ogólne wnioski płynące z przeprowadzonego rozpoznania budowy geologicznej odnoszące się do hipotezy omawianej pracy.

Badany kompleks skał osadowych charakteryzował się stosunkowo niskimi opornościami (z reguły $\rho < 200 \Omega \cdot m$), ale istniejące kontrasty zmierzonych wartości pozwalały na rozróżnienie poszczególnych warstw skalnych. Na tym tle wyróżniały się szczególnie lite piaskowce oraz nagromadzenia luźnych głazów i bloków. Oporność takich ciał wynosiła powyżej $1 k\Omega \cdot m$.

Interpretacja uzyskanych modeli inwersyjnych wskazuje na istnienie w podłożu powierzchni oddzielających stabilny fundament skalny od ulegającej przemieszczeniu zwietrzeliny. Ich geometria wskazuje na występowanie ruchów osuwiskowych o charakterze zarówno rotacyjnym, jak i translacyjnym. Ślady ruchów rotacyjnych stwierdzono bezpośrednio pod ścianami skalnymi Szczelińca Wielkiego oraz Szczelińca Małego, potwierdzając jednocześnie genezę osuwiskową form akumulacyjnych u podstawy stoków. Na odcinkach stoków w niższych pozycjach topograficznych stwierdzano istnienie powierzchni sprzyjających ruchom translacyjnym. Podlegała im drobnopiezniasta zwietrzelina o miąższości od kilku do ok. 15 m wraz z grubofrakcyjnym materiałem deponowanym wcześniej na powierzchni. W ten sposób oddalenie tych największych elementów skalnych mogło sięgać nawet 900 m od właściwej im strefy źródłowej (ścian skalnych), jak np. w przypadku stoków Skalniaka. Interpretacja wyników ERT wraz z resztą przeprowadzonych badań pozwoliły na stworzenie koncepcyjnego modelu, który wyjaśnia rolę osuwisk w mechanizmie transportu głazów i bloków z dala od ścian skalnych.

A7. Pomiary elektrooporowe na obszarze miejskim – przykład Wrocławia

Wrocław jest przykładem miasta, gdzie naturalna konfiguracja terenu jest dziś trudna do rozpoznania. Wynika to z wielowiekowego zagospodarowania obszaru, w tym ścisłej zabudowy mieszkaniowej i przemysłowej, układu infrastruktury drogowej oraz intensywnej regulacji rzeki Odry, prowadzącej do całkowitej przebudowy naturalnych koryt rzecznych. Dodatkowo centrum miasta nadbudowane jest osadami antropogenicznymi, zwanymi w naukach archeologicznych warstwą kulturową. We Wrocławiu ich geneza wiąże się ze średniowiecznym zanieczyszczeniem ulic, przebudową miasta, rozbudową i likwidacją murów miejskich, a także zniszczeniami zabudowy u schyłku II Wojny Światowej. Wrocław tym samym przedstawia sytuację typową dla wielu europejskich miast, założonych na obszarach nizinnych w dnach dużych dolin rzecznych.

Wskazane cechy obszaru miejskiego są wyzwaniem podczas studiów paleogeograficznych, a elementy antropogeniczne wydatnie utrudniają kartowanie geomorfologiczne. Prace z tego zakresu muszą opierać się więc na rozpoznaniu podłoża prowadzonym w czasie wykopów budowlanych czy wierceń. Dokładnych danych na temat osadów podłoża dostarczają także

prace archeologiczne, prowadzone współcześnie przy każdej z nowych inwestycji. Dokumentacja tego typu jest dla centrum Wrocławia bardzo bogata, choć niekoniecznie spójna. Zebrana została m.in. w atlasach geologiczno-inżynierskich (Goldsztein 2009). Mimo to dla innych części miasta, szczególnie na obszarach pozbawionych zabudowy lub w dzielnicach słabo udokumentowanych pracami archeologicznymi, wiedza na temat cech podłoża jest niewystarczająca. Aktualnie cechy tych powierzchni rozpatrywać można na podstawie NMT LiDAR. Modele cyfrowe nie przynoszą jednak odpowiedzi w sprawie form pogrzebanych pod osadami fluwialnymi bądź gruntami nasypowymi.

Głównym celem omawianej pracy było zestawienie istniejących danych o podłożu geologicznym (np. Badura 2010) z analizą NMT LiDAR oraz rozpoznaniem geofizycznym na niezabudowanych terenach miejskich. ERT zostało tu użyte do określenia układu aluwów w wybranych obszarach pradoliny Odry oraz struktury dwóch miejskich wzniesień o nieokreślonej genezie. Prowadzenie pomiarów geofizycznych na obszarze miejskim ma swoją specyfikę: ograniczone jest wieloma zakazami natury prawnej i administracyjnej, a także ograniczeniami technicznymi (np. utwardzeniem gruntu, gęstą siecią dróg etc.) i wymogami bezpieczeństwa (porażenie prądem elektrycznym).

W efekcie przeprowadzonych badań wykonano przestrzenny model miąższości osadów na obszarze wrocławskiego Starego Miasta. Miąższość tych osadów lokalnie przekracza 3 m, jednak jest nieco mniejsza w otoczeniu samego Rynku, gdzie istnieć musiała naturalna wyniosłość terenu (ostaniec erozyjny), ułatwiający bezpieczne od powodzi posadowienie historycznej zabudowy. Zestawione informacje o gruntach nasypowych pozwoliły także na wskazanie 5 najbardziej typowych ich układów sedimentów zależnych od działalności człowieka w przeszłości. O ile wyniki te oparte były o dostępne wcześniej źródła danych, tak modele inwersyjne uzyskane dzięki pomiarom elektrooporowym przyniosły kilka całkowicie nowych informacji. Pozwoliły na (1) określenie miąższości osadów wypełniających dawne koryta Odry oraz (2) odkrycie paleokoryt pod młodszymi osadami aluwialnymi. Dały możliwość wyróżnienia (3) pogrzebanych powierzchni erozyjnych (teras) w obrębie współczesnej równi zalewowej rzeki Widawy i (4) śladów migracji koryt rz. Bystrzycy. Dzięki ERT udowodniono także, że (5) nasyp tworzący współczesne Górze Kaplicznej, a wcześniej miejsce posadowienia wczesnośredniowiecznego grodziska na wrocławskich Osobowicach ma fundament w postaci naturalnego wzniesienia (wydmy). Natomiast wzniesienie Góra Lisie Jamy w zachodniej części Wrocławia jest ostańcem wysoczyzny odseparowanym od niej erozyjnie.

Wykonane badania powstały w okresie, gdy zarówno dane LiDAR, jak i nowoczesne systemy pobrazowania geofizycznego nie były jeszcze w Polsce popularne. Przedstawiono procedurę, umożliwiającą metodyczne badania paleorzeźby na obszarach miejskich. Jednym z efektów wykonanej pracy jest uproszczony szkic geomorfologiczny Wrocławia.

Problemy pozyskiwania, przetwarzania i interpretacji danych ERT

Dyskusja nad wynikami uzyskiwanymi dzięki tomografii elektrooporowej wymaga komentarza dotyczącego ograniczeń tej metody, niepewności pomiarowych oraz potencjalnych błędów interpretacyjnych. ERT jest z jedną z najbardziej uniwersalnych metod geofizycznych, ale jej wadą jest czasochłonność procesu pomiarowego, wymagającego rozkładania oraz składania zestawu elektrod i łączących je kabli. Do ograniczeń technicznych zalicza się w pierwszej kolejności złe uziemienie elektrod, wynikające z reguły ze skrajnego przesuszenia wierzchniej warstwy gruntu lub jego grubookruchowej struktury. Stosowane czasem w tych przypadkach polewanie wodą lub mocowanie elektrod w zwilżonych gąbkach wpływają na wynik i uznać je należy za ostateczność. Poważniejsze błędy interpretacyjne wynikają jednak nie z ograniczeń technicznych, a potencjalnych luk w wiedzy odnośnie uwarunkowań geologicznych, potrzebnej do interpretacji uzyskanych wyników. Z tego względu pomiarom geofizycznym muszą towarzyszyć wiercenia i wkopy kontrolne, wizja pobliskich odśnieżeń, analiza dostępnych map i innych materiałów. Doświadczenie pokazuje, że podawane w literaturze oporności wyznaczone laboratoryjnie dla różnych ośrodków skalnych mogą być jedynie sugestią w prawidłowej interpretacji modeli inwersyjnych. Na uzyskany wynik ma bowiem wpływ zbyt wiele czynników, do których zalicza się nie tylko określona zdolność przewodzenia prądu elektrycznego przez minerały tworzące dany ośrodek skalny, ale także struktura i tekstura skał, ich porowatość, uszczelinienie, spękanie, obecność wody i jej mineralizacja czy temperatura ośrodka skalnego. W większości przypadków to właśnie obecność wody ma decydujący wpływ na wynik pomiarów, a uwilgocenie pozostaje w związku z innymi wymienionymi cechami podłoża. W strefie peryglacialnej przemożny wpływ na uzyskiwany wynik ma termika gruntu. Wysokie wartości oporności elektrycznej stwierdzane dla permafrostu zacierają obecność nawet znaczących różnic litologicznych podłoża.

Wynik obrazowania elektrooporowego zależy także od przyjętego sposobu inwersji geofizycznej, stosowanych parametrów (np. *dumping factor*) oraz ilości wykonanych iteracji. Potencjalne błędy interpretacyjne pociągać może za sobą także finalna wizualizacja przeliczonych danych, wykorzystująca nie pozbawioną wad interpolację wartości oraz najczęściej stosowaną barwną skalę logarytmiczną. Z uwagi na specyfikę metody, w każdym przypadku pod dyskusję należy poddać wyniki pomiarów dotyczące głębszych partii podłoża pod powierzchnią o znaczącej zmianie nachylenia (załomy stoków, grzbiety, zagłębienia).

Podsumowanie

Przedstawione wyniki prac badawczych z wykorzystaniem metody elektrooporowej są wycinkiem moich doświadczeń w pracach geomorfologicznych z użyciem nowoczesnych technik pomiarowych. ERT zajmuje w nich jednak pierwszoplanową rolę. Niezaprzeczalnym atutem tomografii elektrooporowej jest odejście od badań terenu na podstawie pojedynczych stanowisk czy złożonych z punktów pomiarowych transektów. Obrazowanie

dwuwymiarowe, czy też możliwe do otrzymania obrazowanie trójwymiarowe w wielu przypadkach zmienia perspektywę postrzegania rozmieszczenia osadów i skutków działania procesów geomorfologicznych. Zmienia schematy prowadzenia badań naukowych i punkt widzenia na wiele zagadnień badawczych.

W prezentowanym osiągnięciu naukowym dowiodłem przydatności metody elektrooporowej w badaniach geomorfologicznych prowadzonych w różnych, nawet skrajnie od siebie odmiennych środowiskach morfogenetycznych. Prospekcja płytkiego podłoża geologicznego dostarcza wiedzy niezbędnej do prawidłowego zrozumienia uwarunkowań procesów manifestujących się na powierzchni terenu. W ten sposób ERT umożliwia dokonanie istotnych odkryć z dziedziny geomorfologii nawet na obszarach pozornie dobrze rozpoznanych i wielokrotnie opisywanych. ERT służy więc do dostarczania niedostępnych wcześniej danych, reinterpretowania faktów i zmiany utartych poglądów.

Za największą wartość przedstawionego osiągnięcia uważam zobrazowanie kształtu permafrostu w strefie wybrzeża zachodniego Spitsbergenu, odmienne od syntetycznych schematów publikowanych w dotychczasowej literaturze (np. Lachenbruch 1968), opartych o wyniki uzyskiwane w innych częściach świata o innej specyfice. Wypełnia ono lukę w postrzeganiu wpływu morza na ląd poddawany wynoszącym ruchom izostatycznym. Podobnie koncepcja istnienia spodniej warstwy czynnej permafrostu, zależnej od termiki morza, jest całkowicie nowa. Może zmodyfikować schematyczny profil reżimu termicznego podany przez Browna (1970), wymaga jednak bezpośredniego potwierdzenia pomiarami termicznymi. **Rzadko stosowane wykorzystanie małych odstępów między elektrodami pomiarowymi pozwoliło ponadto na dodanie istotnych informacji na temat kształtu stropu permafrostu, silnie zależnego od struktury gruntu.** Otrzymane wyniki pasują do nurtu badań nad współczesnymi zmianami środowiska.

Niewiele mniejszą rangę ma **odkrycie nieznanym speleologom pustek krasowych Jaskini Niedźwiedziej w Sudetach.** Oznacza to perspektywę dla dalszych prac eksploracyjnych. Jest także ważne w obliczu planowanej budowy nowej, drugiej trasy turystycznej po tym obiekcie jaskiniowym. Także **rozpoznanie podłoża na stromo nachylonych stokach Gór Kamiennych i Gór Stołowych trudno przecenić wobec braku innych danych geofizycznych z tych obszarów.** Pozwoliło ono potwierdzić osuwiskową genezę form identyfikowanych w terenie oraz opracować nowe modele rozwoju stoku dla obszaru Gór Stołowych. ERT okazało się także niezwykle przydatne nawet na obszarach najlepiej rozpoznanych wierceniami i wkopami, jak ma to miejsce w podanym przykładzie Wrocławia.

Za pewną oryginalność prezentowanego procesu badawczego można uznać dokładne lokalizowanie profili pomiarowych przy pomocy odbiorników GPS oraz niepowierzchowne wykorzystanie numerycznych modeli terenu o dużej rozdzielczości. W efekcie możliwe było budowanie dwu- i trójwymiarowych modeli budowy geologicznej w ścisłym nawiązaniu do ukształtowania powierzchni. Obrazowanie geofizyczne danych geofizycznych prowadzone w

środowisku GIS pozwala mi na lepszą, wzbogaconą o wyniki analiz NMT interpretację wyników.

Literatura

- Awdankiewicz, M., 1999. Volcanism in a late Variscan intramontane trough: Carboniferous and Permian volcanic centers of the Intra-Sudetic Basin, SW Poland. *Geologia Sudetica* 32, 13–47.
- Badura J., 2010, Geomorfologiczne uwarunkowania lokalizacji lewobrzeżnego osadnictwa Wrocławia. *Wratislavia Antiqua* 11, 15–45.
- Ballantyne C.K., 2007, Patterned ground. [w:] A.E. Scott (ed.): *Encyclopedia of Quaternary Science*, Amsterdam: Elsevier, 2182–2191.
- Baranowski S., 1968. Termika tundry peryglacialnej SW Spitsbergen. *Acta Universitas Wratislaviensis* 68, Studia Geograficzne X, 74 s.
- Brown R.J.E., 1970, Permafrost in Canada: its influence on Northern development. University of Toronto Press, Toronto, 234 pp.
- Chmal H., Klementowski J., Migala K., 1988. Thermal currents of active layer in Hornsund area. [w:] Senneset, K. (Ed.), *Permafrost. Fifth International Conference. August 2–5, Proceedings Vol. 1*. Tapir Pub., Trondheim, Norway, 44–49.
- Ciężkowski W., Madera W., 1985, Wyniki badań znacznikowych nad podziemnymi przepływami wód krasowych w Masywie Śnieżnika (Sudety). *Przegląd Geologiczny* 33, 10, 578.
- Czerny J., Kieres A., Manecki M., Rajchel J., 1992, Geological Map of the SW Part of Wedel Jarlsberg Land Spitsbergen, 1:25 000. Institute of Geology and Mineral Deposits, Univ. of Mining and Metallurgy, Cracow.
- Dobiński W., 2011, Permafrost. *Earth Science Reviews* 108, 158–169.
- Don J., Skácel J., Gotowała R., 2003, The boundary zone of the East and West Sudetes on the 1:50,000 scale geological map of the Velké Vrbno, Staré Město and Śnieżnik Metamorphic Units. *Geologia Sudetica* 35, 1, 25–59.
- Duszyński F., Migoń P., 2015, Boulder aprons indicate long-term gradual and non-catastrophic evolution of cliffed escarpments, Stołowe Mts, Poland. *Geomorphology* 250, 63–77.
- Etzelmüller B., Schuler T.V., Isaksen K., Christiansen H.H., Farbrøt H., Benestad R., 2011. Modeling the temperature evolution of Svalbard permafrost during the 20th and 21st century. *Cryosphere* 5, 67–79.
- Gibert D., *Electrical Resistivity Imaging: New trends for an Old Story*.
- Goldsztejn J., 2009, Baza danych geologiczno-inżynierskich wraz z opracowaniem atlasu geologiczno-inżynierskiego aglomeracji wrocławskiej. Przedsiębiorstwo Geologiczne Proxima S.A. we Wrocławiu, Państw. Inst. Geol., Wrocław.
- Jahn A. 1948. Badania nad strukturą i temperaturą gleb w Zachodniej Grenlandii. *Rozprawy Wydziału Matematycznoprzyrodniczego* 72A (1946), series III, 32(6). Kraków: Polska Akademia Nauk.
- Jodłowski S. 1989, Badania geofizyczne otoczenia Jaskini. [w:] Jahn A., Kozłowski S., Wiszniowska T. (red.), *Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie*. PAN Oddz. we Wrocławiu, Ossolineum, 147–156.
- Karhunen K., 2013, Electrical resistance tomography imaging of concrete. *Dissertations in Forestry and Natural Sciences* 122. University of Eastern Finland, Kuopio.
- Kneisel C., Hauck C., 2008, Electrical methods. [w:] Hauck, C., Kneisel, C. (Eds.), *Applied Geophysics in Periglacial Environments*. Cambridge Univ. Press., 3–27.
- Lachenbruch A.H., 1968 Permafrost. [w:] Fairbridge, R.W. (Ed.), *The Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold Pub. Corp, New York, 833–839.
- Loke M.H., 2013, Manual for RES3DINV. rapid 3-D resistivity & IP inversion using the least-squares method (For 3-D surveys using the pole–pole, pole–dipole, dipole–dipole, rectangular, Wenner, Wenner-Schlumberger and non-conventional arrays). On land, aquatic and cross-borehole surveys. *Geoelectrical Imaging 2-D & 3-D*. Geotomo, Malaysia.

- Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B., 2013, Recent developments in the direct current geoelectrical imaging method. *J. Appl. Geophys.* 95, 135–156.
- Mackay J.R., 1972, Offshore permafrost and ground ice, Southern Beaufort Sea, Canada. *Can. J. Earth Sci.* 9 (11), 1550–1561.
- Martínez J., Benavente J., García-Aróstegui J.L., Hidalgo M.C., Reyd J., 2009, Contribution of electrical resistivity tomography to the study of detrital aquifers affected by seawater intrusion–extrusion effects: The river Vélez delta (Vélez-Málaga, southern Spain). *Engineering Geology* 108, 161–168.
- Meunier J., 2012, One century of imaging the Earth's interior. [W:] Chauris H., Adler A., Lionheart W. (red.), 100 Years of Electrical Imaging. Collection Sciences de la Terre et de l'environnement, Presses des Mines, Paris, 17–19.
- Migoń P., Kasprzak M., 2011, Morfologiczny zapis ruchów masowych na progach morfologicznych Gór Stołowych w świetle numerycznego modelu wysokości o dużej rozdzielczości. *Przyroda Sudetów* 14, 115–124.
- Migoń P., Pánek T., Malik I., Hrádecký J., Owczarek P., Šilhán K., 2010, Complex land slide terrain in the Kamienne Mountains, Middle Sudetes, SW Poland. *Geomorphology* 124: 200–214.
- Morrow F.J., Ingham M.R., McConchie J.A., 2010, Monitoring of tidal influences on the saline interface using resistivity traversing and cross-borehole resistivity tomography. *Journal of Hydrology* 389, 69–77.
- Myroie J.E., Carew J.L., 2003, Karst development on carbonate islands. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers* 1 (2), 1–21.
- Overduin P.P., Wetterich S., Günther F., Grigoriev M.N., Grosse G., Schirrmeister L., Hubberten H.-W., Makarov A., 2016, Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia. *The Cryosphere*, 10, 1449–1462.
- Ploeg M.J. van der, Haldorsen S., Leijnse A., Heim M., 2012, Subpermafrost groundwater systems: Dealing with virtual reality while having virtually no data. *Journal of Hydrology* 475, 42–52.
- Reynolds J.M. 2011, Electrical resistivity methods. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, second ed. Wiley, Chichester, 289–372.
- Saas O., Viles H.A., 2010, Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK. *Journal of Applied Geophysics* 70, 72–83.
- Samouëlian A., Cousina I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G., 2005, Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Res.* 83, 173–193.
- Schrott L., Sass S., 2008, Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology* 93, 55–73
- Sobczyk A., Kasprzak M., Marciszak A., Stefaniak K., 2016, Zjawiska krasowe w skałach metamorficznych w Masywie Śnieżnika (Sudety Wschodnie): aktualny stan badań oraz znaczenie dla poznania ewolucji Sudetów w późnym kenozoiku. *Przegląd Geologiczny* 64, 9, 710–718.
- Szynkiewicz A., 2012, Próbné badania georadarowe (RAMAC/GPR) w rejonie Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. [W:] Ciężkowski W. (red.), Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie w 45-lecie odkrycia. Wrocław–Kletno, 137–152
- Teisseyre A.K., 1973, Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów 1:25 000, ark. Międzygórze. PIG, Warszawa.
- Van Dam R.L., 2012, Landform characterization using geophysics—recent advances, applications, and emerging tools. *Geomorphology* 137, 57–73
- Washburn A.L. 1956, Classification of patterned ground and review of suggestion origins. *Geological Society of America Bulletin* 67, 823–865.
- Washburn A.L. 1969, Patterned ground in the Mesters VIG District, northeast Greenland. *Biuletyn Peryglacjalny* 18, 259–330.
- Werenskiöld W., 1922, Frozen earth in Spitsbergen. *Geofysiske publikationer* II 10, 3–10.
- Wojewoda J., 1997, Upper Cretaceous littoral-to-shelf succession in the Intrasedetic Basin and Nysa Trough, Sudety Mts. [w:] Wojewoda, J. (Ed.), *Obszary źródłowe: zapis w osadach*. Wind, Wrocław, 81–96.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Poza przedstawionym w punkcie 4 osiągnięciem naukowym, moje pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze dotyczyły różnych aspektów geomorfologii, które podzielono poniżej na kilka głównych zagadnień. Osiągnięcia zostaną wymienione oraz krótko skomentowane. Przywoływane w tej części publikacje są jedynie reprezentacyjnymi przykładami. Pełne zestawienie publikacji naukowych, wraz z informacją o udziale autora w przygotowaniu tych prac, znajduje się w Załączniku 5.

Geomorfometria, czyli obiektywne spojrzenie na rzeźbę

W moim dorobku ważną rolę odgrywają badania geomorfometryczne wykorzystujące numeryczne modele terenu (NMT) i narzędzia GIS. Parametryzacja rzeźby umożliwia zachowanie obiektywizmu w charakterystyce geomorfologicznej badanych obszarów oraz lepsze zrozumienie relacji rzeźby z budową geologiczną czy działającymi przy powierzchni Ziemi procesami fizycznymi. W ten sposób dokonałem reinterpretacji rzeźby terenu na obszarze Karkonoskiego Parku Narodowego (Kasprzak i Traczyk 2010) czy Parku Narodowego Gór Stołowych (Kasprzak i Migoń 2015). Przeprowadzone analizy dostarczyły m.in. konkretnych wartości liczbowych mówiących o frekwencji poszczególnych form rzeźby, ich rozmiarach i udziale w powierzchni analizowanych obszarów. W swojej pracy chętnie wykorzystuję TWI (*Topographical Wetness Index*) – wtórny parameter geomorfometryczny, który pokazuje zależność między wielkością powierzchni biorącej udział w spływie powierzchniowym (fragmentie zlewni) a wartością jej nachylenia. Przy jego pomocy można w sposób teoretyczny zbadać, przestrzenny rozkład uwilgocenia powierzchni terenu, co okazało się przydatne choćby do odtworzenia układu podmokłości na obszarach przekształconych przez człowieka w Górach Stołowych (Migoń i Kasprzak 2014), albo opracowania koncepcji odwodnienia masywów piaskowcowych o budowie płytowej (Jancewicz et al. 2019). Parametryzacja powierzchni jest przydatna także podczas prac z zakresu tradycyjnej kartografii geomorfometrycznej, np. pozwala na jednoznaczne wyznaczenie zasięgu den dolin czy spłaszczeń śródstokowych. W taki sposób powstały m.in. wydzielienia na cyfrowej mapie geomorfologicznej Karkonoszy, której jestem współautorem (Traczyk et al. 2013). Podobnie rozpatrywane były wątpliwości dotyczące zasięgu poszczególnych wydzieleni na wzorcowych arkuszach Cyfrowej Mapy Geomorfologicznej Polski w skalach 1:100 000, 1:500 000 (Migoń et al. 2014), które przygotowywałem jako współautor. Wieloletnie doświadczenie w wykorzystaniu modeli cyfrowych pozwoliło mi także na interpretację rzeźby glacialnej na dnie morskim (Tęgowski et al. 2016).

- Jancewicz K., Migoń P., Kasprzak M., 2019, Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index, *Science of The Total Environment*, 656, 1046–1062, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.467.
- Kasprzak M., Migoń P., 2015, DEM-based analysis of Geomorphology of a stepped sandstone plateau, Stołowe Mountains (SW Poland), *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 58, Suppl. 4, 247–270, DOI: 10.1127/zfg_suppl/2015/S-00183

- Kasprzak M., Traczyk A., 2010, Geomorfometria granitowej części Karkonoszy, *Landform Analysis* 13, 33–46.
- Migoń P., Kasprzak M., Jancewicz K., 2014, Cyfrowa Mapa Geomorfologiczna Polski 1:100 000, 1:500 000, ark. Sudety Zachodnie, GUGiK, Gepol, IGIK, Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich (mapa cyfrowa).
- Migoń P., Kasprzak M., 2014, Tereny podmokłe na płaskowyżu Gór Stołowych w świetle parametryzacji powierzchni na podstawie topograficznego indeksu wilgotności (TWI), *Studia Limnologica et Telmatologica*, 8, 1, 57–68.
- Tęgowski J., Trzcińska K., Kasprzak M., Nowak J., 2016, Statistical and Spectral Features of Corrugated Seafloor Shaped by the Hans Glacier in Svalbard. *Remote Sensing* 8, 744, 1–18, doi:10.3390/rs8090744.
- Traczyk A., Kasprzak M., Jancewicz K., 2013, Mapa geomorfologiczna Karkonoszy (mapa cyfrowa obejmująca Karkonoski Park Narodowy z otuliną).

Rewolucja w badaniach geomorfologicznych – LiDAR, UAV i SfM

O ile geomorfometria – dziś już w zasadzie odrębna dyscyplina z pogranicza Nauk o Ziemi i informatyki – wykorzystując numeryczne modele terenu (NMT), doprowadziła do pewnego przełomu w geomorfologii, o tyle wzrost rozdzielczości NMT okazał się dla niej wręcz rewolucyjny. Modele o rozdzielczości submetrowej pozwoliły na rozpoznawanie i analizowanie form terenu o niewielkich rozmiarach lub trudne do rozpoznania z poziomu terenu i niemożliwe do rozróżnienia na ortofotomapach. Modele takie, otrzymywane z przetwarzania chmury punktów otrzymanych na drodze skanowania laserowego (LiDAR – *Light Detection and Ranging*) okazały się niezwykle przydatne zwłaszcza w analizie obszarów zalesionych, obrazując często nierozpoznane wcześniej cechy terenu. Potencjał tych modeli zacząłem wykorzystywać od początku ich dostępności w Polsce; na Dolnym Śląsku skaning tego typu wykonano dla Wrocławia, parków narodowych oraz LKP Sudety Zachodnie³. Gdy dzięki projektowi ISOK⁴ skanowaniem objęto obszar Polski (dziś już niemal w całości), podjąłem starania o uzyskanie danych i odpowiedniej licencji na ich naukowe i dydaktyczne wykorzystanie na Wydziale Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska UWr, gdzie pracuję. Potencjał NMT LiDAR w badaniach geomorfologicznych pokazałem jako współautor metodycznego artykułu (Migoń et al. 2013), który jak dotąd jest jednym z moich najczęściej cytowanych artykułów naukowych (według Google Scholar 32 cytacje). Analiza NMT LiDAR umożliwiła także pierwsze od czasu kartowania terenowego wykonane w 1948 r. spojrzenie na ukształtowanie labiryntu skalnego na Szczelińcu Wielkim w Górach Stołowych (Migoń i Kasprzak 2015a) czy też wnioskowanie o kierunkach rozwoju rzeźby w tym masywie (Migoń i Kasprzak 2015b). Obecnie, dzięki szybkiemu rozwojowi technik fotogrametrycznych oraz łatwej dostępności zdjęć lotniczych, np. wykonywanych z UAV (ang. *unmanned aerial vehicle* – bezzałgowy statek powietrzny) możliwe jest stosunkowo łatwe przygotowanie modeli o rozdzielczościach centymetrowych. Przydatność modeli tworzonych w procedurze SfM (*Structure from Motion*)⁵ na podstawie zdjęć UAV pokazałem, analizując mikrorzeźbę granitowej grupy skalnej Starościńskie Skały w Rudawach Janowickich (Sudety Zachodnie).

³ Leśny Kompleks Promocyjny obejmujący swoim zasięgiem Góry Izerskie oraz zachodnią część Karkonoszy.

⁴ ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami.

⁵ Structure from Motion – procedura fotogrametryczna polegająca tworzeniu trójwymiarowego modelu na podstawie dwuwymiarowych obrazów (zdjęć). Wykorzystuje zjawisko stereoskopii.

Przygotowanie wysokorozdzielczego NMT pozwoliło na rozpoznanie sieci spękań, kociołków wietrzeniowych i innych elementów rzeźby skalnej, które często nie są widoczne z poziomu terenu. W pracy tej dokonano także porównania efektów kartowania form skalnych przy pomocy wizji terenowej oraz modeli dostarczonych z lotniczego skanowania laserowego i fotogrametrii niskiego pułapu.

- Kasprzak M., Jancewicz K., Michniewicz A., 2018, UAV and SfM in detailed geomorphological mapping of granite tors: an example of Starościńskie Skały (Sudetes, SW Poland), *Pure and Applied Geophysics*, special issue "Applications of unmanned aerial vehicles in geosciences" 175, 3193–3207, doi:10.1007/s00024-017-1730-8.
- Migoń P., Kasprzak M., 2015a, Analiza rzeźby stoliwa Szczelińca Wielkiego w Górach Stołowych na podstawie numerycznego modelu terenu z danych LiDAR, *Przegląd Geograficzny* 87, 1, 27–52.
- Migoń P., Kasprzak M., 2015, Pathways of geomorphic evolution of sandstone escarpments in the Góry Stołowe tableland (SW Poland) — Insights from LiDAR-based high-resolution DEM, *Geomorphology* 260, 51–63, doi:10.1016/j.geomorph.2015.08.022.
- Migoń P., Kasprzak M., Traczyk A., 2013, How high-resolution DEM based on airborne LiDAR helped to reinterpret landforms - examples from the Sudetes, SW Poland, *Landform Analysis*, 22, 89–101.

Procesy geomorfologiczne w dolinach rzecznych

Udział w projekcie badawczym „Ekstremalne zdarzenia meteorologiczne i hydrologiczne w Polsce (Ocena zdarzeń oraz prognozowanie skutków dla środowiska życia człowieka)” i realizacja rozprawy doktorskiej dotyczącej fluwialnych zdarzeń ekstremalnych były podstawą moich zainteresowań geomorfologią fluwialną oraz geomorfologicznymi skutkami zdarzeń o charakterze ekstremalnym (wezbraniami rzeczny). Oprócz rozprawy doktorskiej, efektem tych zainteresowań były rozdziały w monografii „Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku i ich skutki” (opublikowane tuż przed obroną rozprawy doktorskiej). W sposób szczegółowy zestawiałem w nich informacje na temat historycznych powodzi w południowo-zachodniej Polsce oraz ich hydrologiczno-geomorfologicznych uwarunkowań, skutków i sposobów prognozowania (Kasprzak 2010a, 2010b, Kasprzak i Migoń 2010). Opracowanie to pozostaje jak dotąd najpełniejszym kalendarium powodzi, a także zestawieniem piśmiennictwa dotyczącego powodzi na opisywanym obszarze.

Zdarzenia powodziowe w maju, czerwcu i sierpniu 2010 r. w tym wezbranie rzeki Miedzianki w Bogatyni (2010-08-7) były okazją do kontynuacji pracy nad zdarzeniami ekstremalnymi w Sudetach także po uzyskaniu stopnia doktora. W ten sposób powstała pierwsza praca, która kompleksowo opisuje geomorfologiczne skutki wezbrań w całych Sudetach Zachodnich (na Łużycach, Śląsku i w Czechach). W pracy tej opublikowano model potencjalnych skutków powodzi w zależności od sytuacji morfologicznej (Kasprzak i Migoń 2015). Bezpośrednie obserwacje wezbrania rzeki Małej Kamiennej w G. Izerskich były także podstawą do opracowania hydrologiczno-geomorfologicznej charakterystyki tego cieku i jego doliny (Kasprzak 2011). Podobnie, jako współautor, opracowałem charakterystykę morfologiczną górnego odcinka doliny Izery (Kasprzak i Traczyk 2011). Dolina ta, wykształcona w obrębie śródgórskiego zrównania wierzchwinowego, jest unikatem przyrodniczym. Izera oraz jej

dopływy wykształciły tu koryta meandrowe, których zakola ulegają dynamicznym przesunięciom podczas letnich wezbrań, a w strefie pozakorytowej dochodzi do transportu pakietów torfu. Zająłem się także zagadnieniem grubofrakcyjnego rumowiska rzeczno, transportowanego podczas wezbrań sudeckich cieków. Zaplanowałem w tym celu pomiary koryta rzeki Łomiczki metodą naziemnego skaningu laserowego, zrealizowane i powtarzane corocznie przez zespół prof. A. Borkowskiego z Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (Józków et al. 2016).

Zainteresowania z zakresu geomorfologii fluwialnej Sudetów pozwoliły mi w ostatnim czasie zaangażować się także w projekty dotyczące prognozowania przepływów rzek i ich skutków (Niedzielski et al. 2014). W mojej pracy dokonywałem interpretacji form korytowych, a w ostatnim czasie, także jako wykonawca projektu LIDER T. Niedzielskiego⁶ współtworzyłem system do monitoringu w czasie rzeczywistym objętości przepływów na rzece Kwisie w okolicach Świeradowa-Zdroju. Stanowiska pomiarowe wyposażone w radary dopplerowskie (urządzenia Raven-Eye) są pierwszymi tego typu instalacjami na rzekach górskich w Polsce i miały za zadanie weryfikację wielkości odpływu z pokrywy śnieżnej, estymowanego na podstawie zdjęć lotniczych (publikacje w przygotowaniu). Współpracowałem także z zespołem historyków prowadzących kwerendę piśmiennictwa dotyczącego klęsk żywiołowych na obszarze Polski (Sobik i Kasprzak 2016).

- Józków G., Borkowski A., Kasprzak M., 2016, Monitoring of fluvial transport in the mountain river bed using terrestrial laser scanning, [w:] The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B7, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic, 523–528, doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B7-523-2016.
- Kasprzak M., 2010a, Wezbrania i powódzie na rzekach Dolnego Śląska, [w:] P. Migoń (red.), Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku i ich skutki, Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego, 14, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, 81–140.
- Kasprzak M., 2010b, Geomorfologiczne i ekologiczne skutki wezbrań, [w:] P. Migoń (red.), [w:] Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku i ich skutki, Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego, 14, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, 141–203.
- Kasprzak M., 2011, Rzeki Mała Kamienna w układzie hydrograficznym Sudetów Zachodnich, Przyroda Sudetów 14, 181–186.
- Kasprzak M., Migoń P., 2010, Prognozowanie geomorfologicznych skutków wezbrań i powodzi, [w:] P. Migoń (red.), Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku i ich skutki, Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego, 14, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, 269–290.
- Kasprzak M., Migoń P., 2015, Historical and recent floods in the West Sudetes – geomorphological dimension, Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementbände 59 Supplementary Issue 3, 73–97, doi:10.1127/zfg_suppl/2015/S-59216.
- Kasprzak M., Traczyk A., 2011, Rzeźba i rozwój doliny Izery w Sudetach Zachodnich, Opera Corcontica 48, 7–34.
- Niedzielski T., Miziński B., Kryza M., Netzel P., Wieczorek M., Kasprzak M., Migoń P., Szymanowski M., Jeziorska J., Witek M., 2014, HydroProg: a system for hydraulic forecasting in real time, based on the multimodelling approach, Meteorology Hydrology and Water Management, 2(2), 65–72.

⁶ Projekt badawczy LIDER/012/223/L-5/13/NCBR/2014 finansowany przez Narodowe Centrum Badan i Rozwoju: „Nowy system automatycznego szacowania ekwiwalentu wodnego śniegu z zastosowaniem bezzałogowego statku powietrznego”.

- Sobik M., Kasprzak M., 2016, Przyrodnicze uwarunkowania klęsk elementarnych na obszarze Dolnego Śląska, [w:] E. Kościak, B. Konopska (red.), Klęski żywiołowe w postaci zdarzeń powodziowych i ich pochodnych na Śląsku od XIV do XX wieku, Wyd. Polskie Towarzystwo Historyczne, Warszawa, 29–62.

Procesy geomorfologiczne na zalesionych stokach górskich

Technika ALS (*Airborne Laser Scanning* – lotniczy skanowanie laserowe) dostarczyła nowych informacji na temat rzeźby Sudetów, pozwalając na odkrycia z zakresu geomorfologii na silnie zalesionych stokach. Współpracując z kolegami i koleżankami z Zakładu Geomorfologii IGRR UWr, miałem okazję do znacznego rozszerzenia naszej wiedzy na temat rzeźby osuwiskowej Sudetów. W pracach tych moje zadania skupiały się na analizie NMT LiDAR, kartowaniu terenowym oraz pomiarach geofizycznych podłoża geologicznego (Migoń et al. 2014a, 2017a, 2017b). Wykazano, że w samych Górach Kamiennych formy osuwiskowe zajmują powierzchnię 307 ha, podczas gdy wcześniej udokumentowano ich obecność na zaledwie 88 ha (Migoń et al. 2014b).

Nowością w rozważaniach na temat rozwoju stoku były prace dotyczące jego mikrorzeźby powodowanej obecnością drzew. Na podstawie szczegółowego kartowania terenowego oraz rozpoznania gleboznawczego udowodniono silny wpływ wykrotów na formowanie się pokryw stokowych (Pawlik i Kasprzak 2015, Pawlik et al. 2017). Moją rolą w tych badaniach było zobrazowanie ERT, w jaki sposób na zwietrzelinę skalną oddziałują korzenie drzew w różnych stadiach rozwoju – zdrowe drzewa, drzewa martwe, wykroty (Pawlik i Kasprzak 2018). Uzyskane wyniki wskazały na dezintegrację podłoża oraz zmiany wilgotnościowe w jego obrębie. Były także jednym z nielicznych przykładów zastosowania metod geofizycznych w badaniach z zakresu biogeomorfologii. Innym przykładem unikatowych badań była praca Duszyńskiego et al. (2016), opisująca formowanie pokryw stokowych na obszarze piaskowcowym w warunkach silnej erozji podpowierzchniowej. Wykonane przeze mnie pomiary ERT pomogły w estymacji wielkości dostawy materiału piaszczystego deponowanego u podstawy ścian skalnych.

- Duszyński F., Migoń P., Kasprzak M., 2016, Underground erosion and sand removal from a sandstone tableland, Stołowe Mountains, SW Poland. *Catena* 147, 1–15, doi:10.1016/j.catena.2016.06.032.
- Migoń P., Kasprzak A., Malik I., Kasprzak M., Owczarek P., Wistuba M., Panek T., 2014a, Geomorphological, pedological and dendrochronological signatures of a relict landslide terrain, Mt Garbatka (Kamienne Mts), SW Poland, *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2014.05.005
- Migoń P., Jancewicz K., Kasprzak M., 2014b, Zasięg obszarów objętych osuwiskami w Górach Kamiennych (Sudety Środkowe) – porównanie map geologicznych i cyfrowego modelu wysokości z danych LiDAR, *Przegląd Geologiczny* 62, 9, 463–471.
- Migoń P., Duszyński F., Kasprzak M., Różycka M., 2017a, Evolving slope instability zone at Mt. Turzyna (Sudetes, SW Poland) – An example of incipient deep-seated gravitational slope deformation. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF Volume 61 Issue 2, 135–148, doi: 10.1127/zfg/2017/0435.
- Migoń P., Jancewicz K., Różycka M., Duszyński F., Kasprzak M., 2017b, Large-scale slope remodelling by landslides – Geomorphic diversity and geological controls, Kamienne Mts., Central Europe. *Geomorphology* 289, 134–151, doi:10.1016/j.geomorph.2016.09.037

- Pawlik Ł., Kasprzak M., 2015, Electrical resistivity tomography (ERT) of pit-and-mound microrelief, Mt Rogowa Kopa case study, the Stołowe Mountains, SW Poland. *Landform Analysis* 29, 41–47, doi: 10.12657/landfana.029.006
- Pawlik Ł., Kasprzak M., 2018, Regolith properties under trees and the biomechanical effects caused by tree root systems as recognized by Electrical Resistivity Tomography (ERT), *Geomorphology* 300, 1–12, doi:10.1016/j.geomorph.2017.10.002.
- Pawlik Ł., Musielok Ł., Migoń P., Wrońska-Wałach D., Duszyński F., Kasprzak M., 2017, Deciphering the history of forest disturbance and its effects on landforms and soils – lessons from a pit-and-mound locality at Rogowa Kopa, Sudetes, SW Poland. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* 12, 59–81, doi:10.2478/12255

Uwarunkowania procesów geomorfologicznych w środowisku peryglacjalnym

Sezonowe tajanie górnej warstwy permafrostu, tzw. warstwy czynnej, warunkuje działanie wielu procesów geomorfologicznych w środowisku peryglacjalnym. Wzrost temperatur powietrza powodowany ociepleniem klimatu i dłuższe oddziaływanie na permafrost wody w stanie ciekłym powodują, że w okresach letnich rozmarza on coraz głębiej, wpływając na większą aktywność procesów stokowych. Jednocześnie nie mamy pełnej wiedzy na temat przestrzennego kształtowania się warstwy czynnej permafrostu na obszarach o urozmaiconej morfologii, ponieważ większość danych pochodzi z pojedynczych, często oddalonych od siebie stanowisk pomiarowych. Fakt ten zainspirował mnie do stworzenia na Ziemi Wedela Jarslberga (SW Spitsbergen) sieci termistorów, mierzących temperaturę podłoża (do głębokości 1,5 m) w górskiej, niezlodowaconej zlewni, gdzie możliwy jest także pomiar objętości odpływu z jej powierzchni. Prace podjęto dzięki finansowemu wsparciu NCN w ramach grantu SONATA10 „Przestrzenne i czasowe uwarunkowania dynamiki warstwy czynnej zmarzliny w Arktyce, na obszarze doliny górskiej”. Pomiarom termiki gruntu, towarzyszyły okresowe pomiary meteorologiczne i hydrologiczne (sezony ablacyjne 2017 i 2018) oraz rozpoznanie geofizyczne podłoża. Zebrane dane są analizowane. Na podstawie pomiarów z pierwszego sezonu badawczego zbadano, jak na termikę górnych warstw gruntu wpływają uwarunkowania topograficzne (Kasprzak i Szymanowski 2018). Przestrzenny rozkład temperatury na różnych głębokościach w odniesieniu do popularnych parametrów definiujących rzeźbę (Elevation, Aspect, Profile Curvature, Planar Curvature, Topographic Position index i inne) i dopływ energii słonecznej (Total Solar Radiation, Direct Solar radiation i inne) określono przy pomocy modeli regresyjnych. Otrzymane wyniki wskazują m.in., że do głębokości 5 cm termika gruntu nie zależy od sytuacji terenowej. Jest więc uzależniona od rodzaju podłoża. Do głębokości 50 cm zauważalny był wpływ temperatury notowanej na powierzchni terenu. Od głębokości 10 cm występowała negatywna korelacja między wysokością wyrażoną zarówno przez wysokość bezwzględną jak i parametry opisujące wysokość względną. Korelacja ta rosła do głębokości 50 cm, a potem malała, jednak pozostawała nadal istotna. Każdy z zainstalowanych termistorów dostarczył informacji o rozmarzaniu głębszym niż 1,5 m. Aby określić miąższość warstwy czynnej posłużono się narzędziami geofizycznymi – ERT oraz EM (pomiary elektromagnetyczne). Pomiary wskazały,

że miąższość warstwy czynnej w badanej zlewni może wynosić 4 m, co przewyższa wcześniej raportowane wartości dla tego obszaru (Kasprzak et al. 2018).

Moja dotychczasowa aktywność badawcza na obszarach polarnych ma odzwierciedlenie, poza wymienianymi już publikacjami, w publikacjach podsumowujących aktualny stan wiedzy (Migoń i Kasprzak 2013, Zwoliński et al. 2013).

- Kasprzak M., Tábořík P., Waroszewski J., Głowacki., Marszałek H., Marciniec K., Łopuch M., 2018, Spatial and temporal controls on active layer dynamics in an Arctic mountain valley: project assumptions and preliminary results. [w:] P. Deline, X. Bodin and L. Raveland (eds), the 5th European Conference On Permafrost – Book of Abstracts, 23 June – 1 July 2018, Chamonix, France, 575–576.
- Kasprzak M, Szymanowski M., 2018, Terrain determinants of permafrost active layer thermal conditions: a case study from Arctic deglaciated catchment (Brattegddalen, SW Spitsbergen), PeerJ Preprints 6:e27119v2, doi:10.7287/peerj.preprints.27119v2
- Migoń P., Kasprzak M., 2013, Rzeźba (w rozdziale: Środowisko geograficzne otoczenia Stacji Polarnej im. Stanisława Baranowskiego – Lodowiec Werenskiolda) [w:] Z. Zwoliński, A. Kostrzewski, M. Pulina (red.), Dawne i współczesne geosystemy Spitsbergenu, Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań, 104–114.
- Zwoliński Z., Giżejowski J., Karczewski A., Kasprzak M., Lankauf K.R., Migoń P., Pękała K., Repelewska-Pękałowa J., Rachlewicz G., Sobota I., Stankowski W., Zagórski P., 2013, Geomorphological settings of Polish research areas on Spitsbergen, Landform Analysis 22, 125–143.

Zarządzanie środowiskiem przyrodniczym i popularyzacja wiedzy

Moją aktywność publikacyjną uzupełnia współautorstwo rozdziałów w monografiach, które zbierają wiedzę geomorfologiczną na temat dolnośląskich parków narodowych (np. Kasprzak i Traczyk 2013, Migoń et al. 2018) i na temat regionu południowo-zachodniej Polski (Migoń i Kasprzak 2015a, 2015b). Współpraca z dyrekcjami parków narodowych zaowocowała także bogato ilustrowanymi książkami o charakterze popularno-naukowym (Kasprzak 2012, Duszyński et al. 2015). Inne moje publikacje popularno-naukowe dotyczyły wypraw naukowych, w których uczestniczyłem (Arktyka, Antarktyka, Ałtaj), środowiska Wrocławia, powodzi. Wyprawy polarne stały się także aktualnym tematem wygłaszanych przeze mnie prelekcji popularno-naukowych we wrocławskich szkołach.

W 2012 r. podjąłem się rozpoznania i opisanie (przy deficycie źródeł literaturowych) sytuacji geologiczno-geomorfologicznej Przemkowskiego Parku Krajobrazowego, tworząc operat ochrony przyrody nieożywionej dla tego obszaru (Kasprzak 2013). Podczas tej pracy udokumentowałem i sklasyfikowałem formy rzeźby glacialnej i fluwioglacialnej, eolicznej (wydmy), fluwialnej i biogenicznej, wskazując na zagrożenia dla ich stanu oraz proponując działania ochronne.

W okresie po uzyskaniu tytułu doktorskiego kontynuowałem współpracę z firmami wykonującymi opracowania z zakresu ochrony środowiska. Angażowałem się głównie w projekty dotyczące procesów fluwialnych oraz prognozy oddziaływania na środowisko państwowych dokumentów strategicznych. Pracowałem nad nimi w charakterze wykonawcy. Na potrzeby niniejszego wniosku przedstawiam tytuły 10 takich opracowań. W czasie mojej

całej aktywności zawodowej współtworzyłem ok. 40 takich dokumentów. Wśród nich znajdowały się m.in. sprawozdania z obserwacji geologiczno-geomorfologicznych na stanowiskach archeologicznych. Więcej szczegółów na ten temat dostarczy wykaz publikacji w załączniku 5. Wszystkie prace badawczo-naukowe i popularyzatorskie w okresie 2010–2015 były realizowane wraz z innymi zadaniami wynikającymi ze stosunku pracy (prace biurowe i administracyjne, stworzenie i prowadzenie serwisu internetowego Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego, redakcja techniczna instytutowych wydawnictw i inne). Od roku 2015 jest ona współdzielona z obowiązkami dydaktycznymi, w każdym roku ponad pensum akademickie.

- Duszyński F., Migoń P., Kasprzak M., 2015, Góry Stołowe. Kraina zrodzona z morza. Park Narodowy Gór Stołowych, Kudowa-Zdrój, Bimart, 132 s.
- Kasprzak M., 2012, Panoramy Karkonoszy, Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra, 70 s.
- Kasprzak M., 2013, Operat ochrony przyrody nieożywionej dla Przemkowskiego Parku Krajobrazowego, maszynopis (na zlecenie BULiGL w Brzegu).
- Kasprzak M., Traczyk A., 2013, Ukształtowanie powierzchni, [w:] R. Knapik, A. Raj (red.), Przyroda Karkonoskiego Parku Narodowego, Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra, 47–90.
- Migoń P., Duszyński F., Kasprzak M., 2018, Ukształtowanie terenu i procesy rzeźbotwórcze, [w:] C. Kabała (red.), Góry Stołowe – przyroda i ludzie, Park Narodowy Gór Stołowych, Kudowa-Zdrój, 31–46.
- Migoń P., Kasprzak M., 2015a, Regiony fizycznogeograficzne, [w:] A. Żelaźniewicz (red.), Przyroda Dolnego Śląska, Wyd. II, Oddział Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu, Wrocław, 19–36.
- Migoń P., Kasprzak M., 2015b, Rozwój rzeźby terenu, [w:] A. Żelaźniewicz (red.), Przyroda Dolnego Śląska, Wyd. II, Oddział Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu, Wrocław, 101–144.

Podsumowanie dorobku po uzyskaniu stopnia doktora

Mój dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora przedstawia się następująco:

Współautorstwo lub autorstwo samodzielne:	Liczba:
Recenzowane artykuły naukowe z bazy JCR	24 (w tym <i>on-line first</i> : 1) ⁷
Recenzowane artykuły naukowe z listy B MNiSW	24 ⁸
Rozdziały w monografiach	9
Redakcja monografii naukowych	2
Książki popularnonaukowe	2
Inne publikacje popularnonaukowe	6
Recenzje i sprawozdania	1
Przewodniki sesji terenowych	1
Abstrakty konferencyjne	24
Ekspertyzy środowiskowe	10

⁷ W podanej liczbie zawiera się także jedna publikacja indeksowana w bazie JCR, ale traktowana jako materiał konferencyjne (szegóły w Załączniku 5).

⁸ Dodatkowe dwa artykuły z listy B MNiSW są indeksowane w bazie JCR i zostały wykazane w rubryce wyżej.

Mapy geomorfologiczne	2
Wygłoszone referaty na konferencjach naukowych	13 (w tym po angielsku: 7)
Udział w projektach badawczych	7 (w tym jako kierownik: 3)
Liczba cytowań według Web of Science	88 (z autocytacjami: 109)
Indeks Hirscha według Web of Science	6
Sumaryczny <i>impact factor</i> opublikowanych prac	61,003

Spis treści

1. Imię i Nazwisko	1
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	1
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	1
4. Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) przedstawiam cykl siedmiu publikacji naukowych powiązanych tematycznie pod zbiorczym tytułem:	1
a) tytuł osiągnięcia naukowego	1
b) publikacje naukowe wchodzące w cykl tematyczny	2
c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	4
Wprowadzenie	4
Podstawowe założenia i rozwój badań elektrooporowych	5
A1. Oddziaływanie morza na permafrost w strefie brzegowej SW Spitsbergenu	6
A2. Kształt permafrostu na wybrzeżu skalistym – przykład Przylądka Wilczka	8
A3. Wykształcenie gruntów strukturalnych i ich wpływ na strop permafrostu	9
A4. Pustki krasowe – inny aspekt ekstremalnie wysokich oporności elektrycznych podłoża	11
A5. Złożone mechanizmy ruchów masowych w Sudetach	13
A6. Uwarunkowania ruchów masowych w obszarze o rzeźbie krawędziowej	14
A7. Pomiary elektrooporowe na obszarze miejskim – przykład Wrocławia	15
Problemy pozyskiwania, przetwarzania i interpretacji danych ERT	17
Podsumowanie	17

Literatura	19
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	21
Geomorfometria, czyli obiektywne spojrzenie na rzeźbę.....	21
Rewolucja w badaniach geomorfologicznych – LiDAR, UAV i SfM	22
Procesy geomorfologiczne w dolinach rzecznych.....	23
Procesy geomorfologiczne na zalesionych stokach górskich	25
Uwarunkowania procesów geomorfologicznych w środowisku peryglacjalnym	26
Zarządzanie środowiskiem przyrodniczym i popularyzacja wiedzy	27
Podsumowanie dorobku po uzyskaniu stopnia doktora.....	28

M. Karpnech