



Słowackie Tatry Wysokie  
– widok na południowy zachód  
ze Świstowego Szczytu



#### mgr Tanishka Soni

Jest doktorantką drugiego roku w Instytucie Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk. Jej projekt doktorski jest zatytułowany *Rozwikłanie historii kolizji Zachodnich Karpat poprzez modelowanie geofizyczne i geologiczne*. Ukończyła magisterium z geologii na Uniwersytecie Savitribai Phule Pune (Indie).  
ndsoni@cyf-kr.edu.pl

# ECHA Z KARPAT

Badania Karpat za pomocą fal sejsmicznych umożliwiają odkrywanie tajemnic ukrytych głęboko pod ziemią.

**Tanishka Soni**  
**Mateusz Mikołajczak**  
**Stanisław Mazur**

Instytut Nauk Geologicznych  
Polska Akademia Nauk w Warszawie

**Christian Schiffer**

Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet w Uppsali

**K**arpaty rozciągają się na obszarze Europy Środkowej i Wschodniej. Wyróżniają się w krajobrazie i odgrywają kluczową rolę w historii kulturowej regionu i zachowaniu jego bioróżnorodności. Łańcuch górski ma ponad 1500 km długości i ciągnie się przez terytoria ośmiu krajów: Austrii, Czech, Słowacji, Polski, Węgier, Ukrainy, Rumunii

i Serbii. Karpaty są przedłużeniem alpejskiego pasma górskiego, a ich geologia jest złożona, odzwierciedlając długą historię sedymentacji, aktywności tektonicznej i erozji. Choć góry są badane od ponad 150 lat, a ich geologia powierzchniowa jest dobrze poznana, to ich głęboka struktura pozostaje przedmiotem różnych hipotez. Tylko badania geofizyczne mogą wspierać geologię powierzchniową w odkrywaniu tego, co kryje się pod powierzchnią tego malowniczego łańcucha.

Karpaty są częścią większego alpejsko-himalajskiego pasma górskiego, które powstało w wyniku kolizji płyt tektonicznych – afrykańskiej i eurazjatyckiej. Formowanie się Karpat rozpoczęło się w erze mezozoicznej, w kredzie (około 145–66 mln lat temu), i postępowało w erze kenozoicznej, w paleogenie (około 66–23 mln lat temu) i neogenie (23–2,5 mln lat temu). Powstanie Karpat jest ściśle związane z zamknięciem dawnego Oceanu Tetydy i późniejszą kolizją kontynentu europejskiego z małymi fragmentami kontynentalnymi oraz łańcuchami wysp wulkanicznych będącymi wczesnymi zwiastunami zbliżającej się płyty



#### dr Mateusz Mikołajczak

Pracuje jako adiunkt w Instytucie Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk. Jego główne zainteresowania badawcze to analiza pól potencjalnych, geofizyka stosowana, tektonika płyt i geologia strukturalna. Jest członkiem Grupy Badawczej Systemów Depozycyjnych (DEPOS) w Centrum Badawczym w Krakowie.  
ndmikola@cyf-kr.edu.pl



**prof. dr hab.  
Stanisław Mazur**

Jest profesorem w Instytucie Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk i obecnie pełni funkcję dyrektora. Jego główne zainteresowania badawcze to tektonika, geologia strukturalna, analiza basenów i geofizyka stosowana. Od 2018 roku kieruje Grupą Badawczą Systemów Depozycyjnych (DEPOS) w Centrum Badawczym w Krakowie.

ndmazur@cyf-kr.edu.pl



**doc. Christian  
Schiffer**

Pracuje od 2019 roku w Instytucie Nauk o Ziemi Uniwersytetu w Uppsali. Wykorzystuje geofizykę, głównie metody seismologiczne, do rozwiązywania problemów tektonicznych i geodynamicznych na całym świecie. Specjalizuje się m.in. w geodynamice Arktyki, powstawaniu i strukturze litosfery prekambryjskiej, a ostatnio w strukturze pasma alpejsko-dynaryjsko-karpackiego oraz ewolucji płyty adriatyckiej.

christian.schiffer@geo.uu.se

Surowe dane  
ze stacji CP15A

afrykańskiej. Łańcuch górski Karpat można podzielić na trzy główne segmenty: Karpaty Zachodnie, Karpaty Wschodnie i Karpaty Południowe. Każdy z nich ma odrębne cechy geologiczne i historię.

Karpaty Zachodnie obejmują góry w Czechach, na Słowacji i w Polsce. Charakteryzują się złożoną budową pasma fałdowego składającego się z licznych płaszczowin, które są dużymi pakietami skał ponasuwanych na siebie w wyniku działania sił tektonicznych. W skład Karpat Zachodnich wchodzi mezozoiczne skały osadowe, w tym wapień i dolomity, które są pozostałościami dawnych płytkich mórz. Tatry, należące do Karpat Zachodnich, są zbudowane w większości z granitów, które zostały odsłonięte dzięki wypiętrzeniu się masywu i równoczesnej erozji.

Współczesny krajobraz Karpat jest urozmaicony i odzwierciedla zarówno rodzaj podłoża skalnego i jego strukturę, jak i efekty aktywności tektonicznej, zlodowaceń i erozji. Najwyższe szczyty Karpat znajdują się w Tatrach, gdzie Gerlach na Słowacji osiąga wysokość 2655 m n.p.m. Rzeźba Tatr charakteryzuje się urwistymi szczytami, głęboko wciętymi dolinami i zjawiskami krasowymi.

## Ewolucja tektoniczna

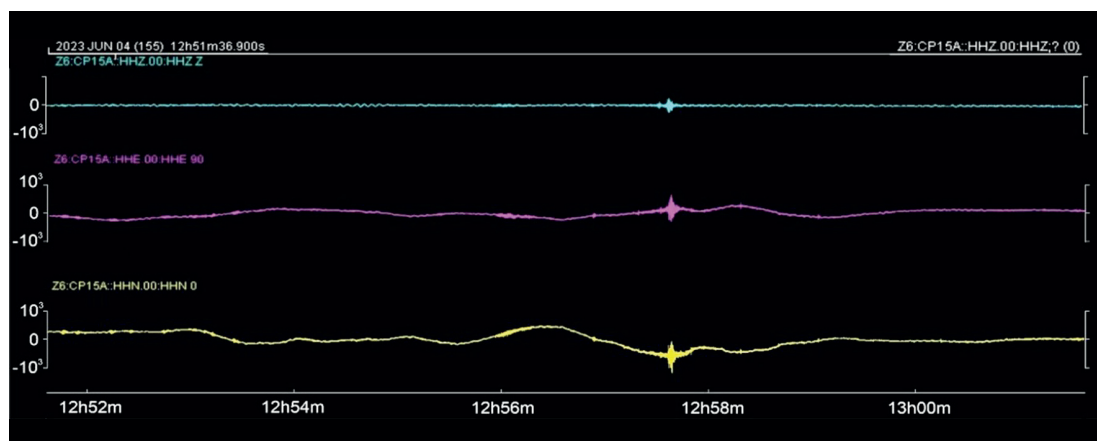
Karpaty znajdują się w strefie kolizji płyty eurazjatyckiej i kilku mniejszych jednostek tektonicznych, w tym płyty adriatyckiej i mikroplaty ALCAPA (Alpy-Karpaty-Kotlina Panońska). Ewolucja tektoniczna i geologiczna Karpat jest ściśle związana z Alpami, które powstały w wyniku kolizji płyt afrykańskiej i eurazjatyckiej oraz subdukcji Oceanu Tetydy. Karpaty zaczęły się formować w późnej jurze (około 150 mln lat temu), podczas zamykania się Oceanu Tetydy. Subdukcja skorupy oceanicznej doprowadziła do akrecji skał osadowych, które później zostały włączone w masywy karpaccie.

W późnej kredzie (około 100–66 mln lat temu) region doświadczył działania znaczących sił kompresyjnych, prowadzących do rozwoju sieci uskoków i nasu-

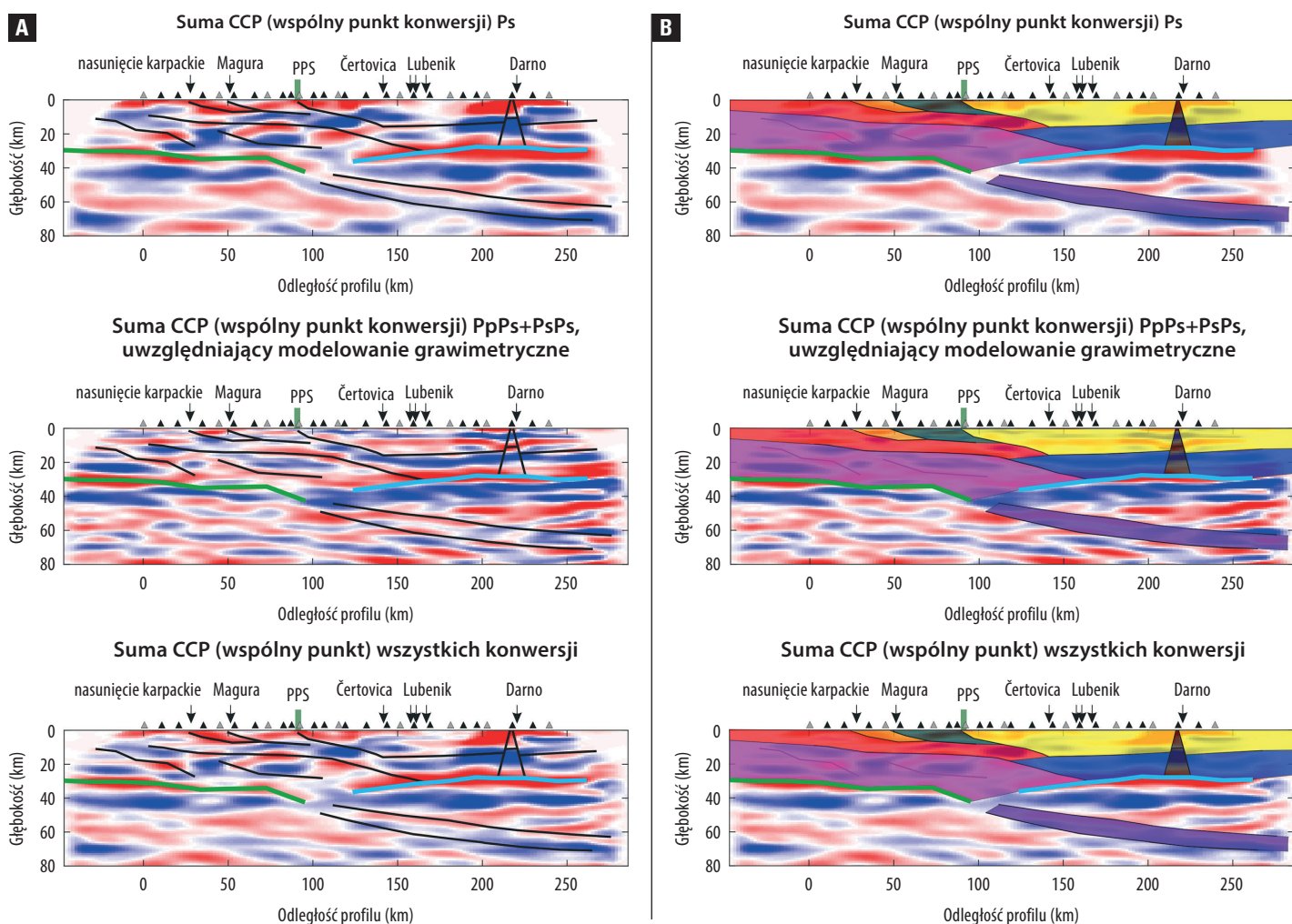
wania się płaszczowin. Procesy te były szczególnie intensywne w Karpatach Zachodnich, gdzie kolizja płyty europejskiej z mikroplatą ALCAPA o proweniencji afrykańskiej doprowadziła do znaczącego skrócenia i pogrubienia skorupy ziemskiej. Do najważniejszego etapu ewolucji tektonicznej Karpat doszło w paleogenie i wczesnym neogenie (około 66–15 mln lat temu). Wtedy europejskie obrzeżenie Oceanu Tetydy zderzyło się z małymi fragmentami kontynentalnymi i łukami wysp związanymi z płytą afrykańską. Ta kolizja doprowadziła do powstania pasma górskiego, które zostało nasunięte na brzeg płyty europejskiej. W tym okresie łuk Karpat zaczął się formować jako wyraźna, regionalna struktura geologiczna.

Reżim tektoniczny Karpat ponownie uległ zmianie w środkowym i późnym miocenie (około 15–5 mln lat temu), gdy subdukująca pod Karpaty płyta europejska zaczęła się cofać. Cofanie się płyty (ang. *slab rollback*) to proces, w którym zanurzająca się płyta tektoniczna cofa się pod własnym ciężarem, powodując ekstensję nadległej, górnej płyty. W przypadku Karpat ekstensja doprowadziła to do powstania Kotliny Panońskiej na terenie dzisiejszych Węgier, obszaru o zredukowanej grubości skorupy ziemskiej i grubej pokrywie skał osadowych. Rozciąganie górnej płyty doprowadziło również do aktywności wulkanicznej w wewnętrznych częściach Karpat. Te zjawiska są kluczowym aspektem ewolucji tektonicznej regionu, ponieważ ukazują dynamiczną interakcję między siłami kompresyjnymi a ekstensyjnymi.

Karpaty Zachodnie mają złożoną budowę geologiczną i obejmują kilka odrębnych jednostek tektonicznych. Na północy znajdują się Karpaty Zewnętrzne, które są zbudowane ze skał osadowych kredy i paleogenu. Dalej na południe leżą Karpaty Centralne i Karpaty Wewnętrzne, w których skład wchodzi m.in. fragmenty starszego podłoża uformowanego jeszcze w trakcie orogenezy waryscyjskiej (około 370–290 mln lat temu). Dwie znaczące struktury, tzw. szwy tektoniczne, strefa Meliata i Pieniński Pas Skałkowy (PPS), oddzielają odpowiednio







Wyniki badań sejsmicznych i ich interpretacja. A) Suma CCP z zaobserwowanymi strukturami, B) Suma CCP z interpretacją zaobserwowanych struktur

Karpaty Zewnętrzne od Centralnych i Centralne od Wewnętrznych.

PPS, który powstał po zamknięciu Oceanu Alpejskiej Tetydy, składa się ze skał osadowych i w przeciwieństwie do typowych struktur tego typu (szwów tektonicznych) nie wykazuje niektórych charakterystycznych cech geologicznych. Za miejsce powstania serii osadów tworzących PPS uznaje się hipotetyczne wyniesienie dna oceanicznego zwane grzbietem czorsztyńskim. Obecnie pozostałości grzbietu czorsztyńskiego powinny być głęboko pograżone pod Karpatami Centralnymi. W przeszłości grzbiet czorsztyński miał dzielić Ocean Alpejskiej Tetydy na dwa mniejsze baseny: północny – Magurę, i południowy – Vahic.

## Badania eksperymentalne

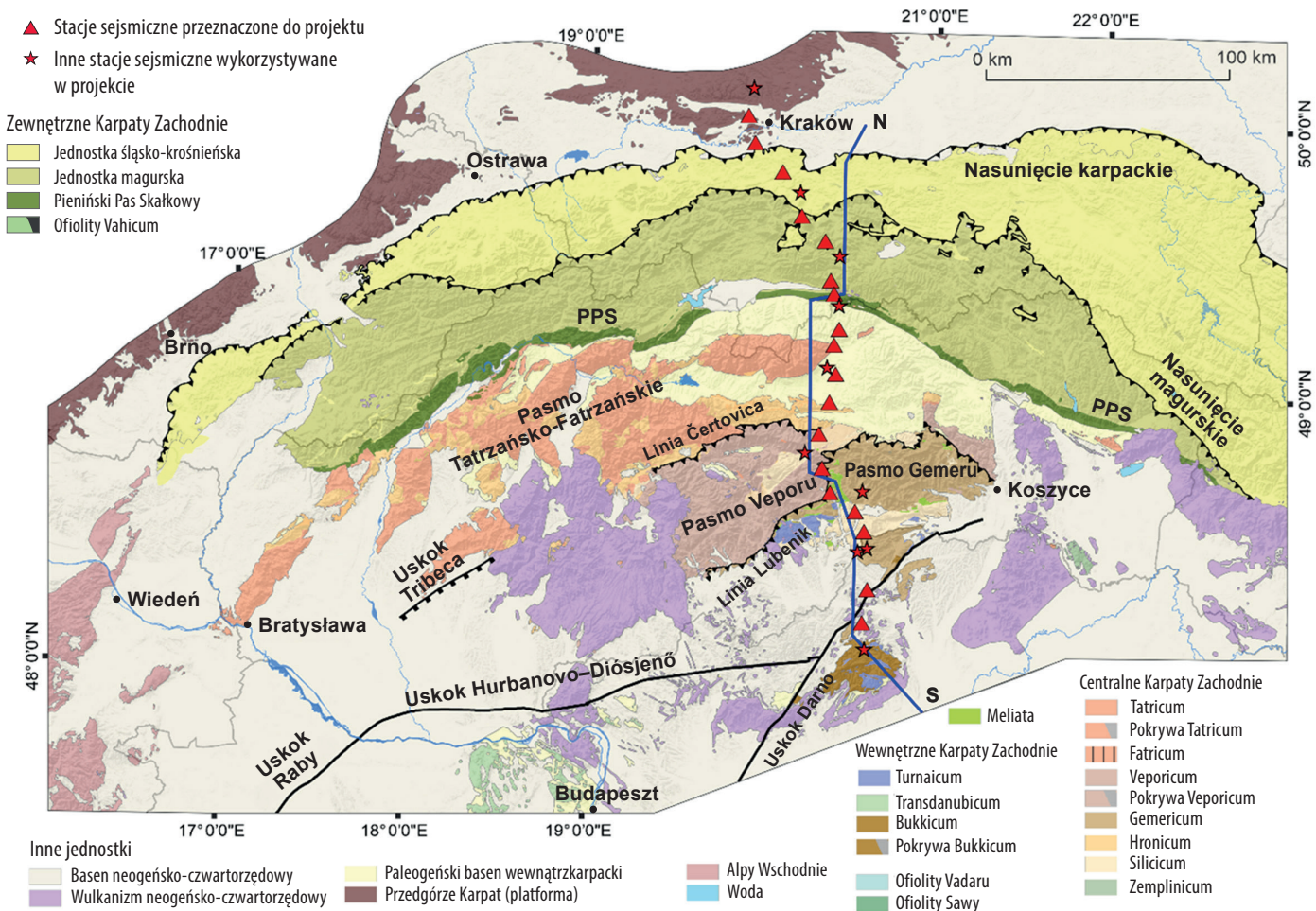
Żeby poznać wewnętrzną strukturę PPS oraz możliwe pozostałości grzbietu czorsztyńskiego, przeprowadzono badania za pomocą pasywnych metod sejsmicznych. W przeciwieństwie do metod aktywnych, w których sztuczne źródła (np. wybuchy, wibracje)

generują fale sejsmiczne, eksperymenty pasywne polegają na wykrywaniu naturalnych fal sejsmicznych generowanych przez trzęsienia ziemi z całego świata.

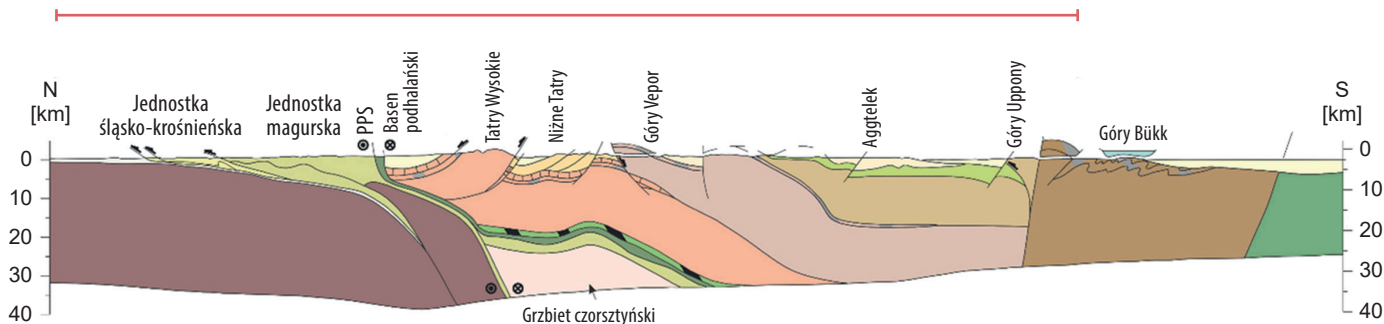
Pierwszym krokiem eksperymentu było rozstawienie stacji sejsmicznych wzdłuż profilu od Krakowa po Miskolc na Węgrzech. Łącznie uruchomiono 18 stacji sejsmicznych, z czego 12 dostarczył GFZ Poczdam, a sześć Uniwersytet Friedricha Schillera w Jenie w Niemczech. Stacje te zostały rozmieszczone podczas prac terenowych w maju 2023 roku. Ich lokalizacja została starannie dobrana, by zminimalizować szumy wywołane przez człowieka i zapewnić niezawodność zbierania danych – zostały umieszczone w spokojnych obszarach, często w nieużywanych budynkach zapewniających jednocześnie dostęp do energii elektrycznej i zasięg sieci komórkowej. Stacje sejsmiczne nieustannie monitorują wszelkie drgania gruntu, w tym trzęsienia ziemi. Rejestrowane dane są przechowywane na dyskach SSD lub kartach SD, a także przesyłane na serwer online znajdujący się w Jenie. Zebrane dane są wykorzystywane do tworzenia tzw. funkcji odbiorczych (ang. *receiver functions*), które

## LEGENDA

- „Europejskie” Moho
- „ALCAPA” Moho
- Obserwowane struktury
- „Europejska” środkowa/dolna skorupa
- „Europejska” dolna skorupa
- Dolna skorupa ALCAPA
- „Europejska” górna skorupa
- Pasma nasunięciowo-fałdowe Karpat Zewnętrznych
- Jednostka magurska
- Jednostki płaszczowinowe ALCAPA
- Uskok Darno



**Profil stacji**



Mapa geologiczna Karpat Zachodnich

są matematycznymi przekształceniami zarejestrowanych fal sejsmicznych. Funkcje te wizualizują struktury geologiczne pod powierzchnią, analizując, w jaki sposób napływające fale sejsmiczne oddziałują z różnymi warstwami skalnymi powodującymi ich odbicia, załamania i konwersje.

**Budowanie modelu podpowierzchniowego**

Na podstawie danych zebranych w ciągu ostatniego roku przetworzone funkcje odbiorcze zostały wy-

korzystane do wygenerowania wglębnych obrazów strukturalnych za pomocą metody tzw. wspólnego punktu konwersji (ang. *common conversion point*). Obrazy te tworzy się przez zsumowanie wszystkich informacji strukturalnych z funkcji odbiorczych dla wszystkich zarejestrowanych trzęsień ziemi w każdej ze stacji, konstruując wspólny model. Ta metoda oferuje szczegółowy obraz budowy wglębnej, ponieważ ukazuje zmienności w prędkościach fal sejsmicznych, które odpowiadają różnym warstwom geologicznym. Otrzymane wyniki są konfrontowane z istniejącą literaturą geofizyczną i geologiczną, by zbudować spójny model regionalny.



Obrazowanie sejsmiczne pozwoliło rozpoznać wiele interesujących cech budowy głębszej Karpat Zachodnich:

1. Granica między skorupą ziemską a płaszczem została zidentyfikowana na głębokości około 30 km na większości obszaru badań. Jednak zauważono znaczące pogrubienie skorupy o 10 km w odległości około 100 km na południe od Krakowa, po czym powraca ona do swojej typowej grubości na obszarze Słowacji i Węgier. Widać również nieciągłość w płaszczu nachyloną na południe pod Karpatami Centralnymi.
2. W podłożu płaszczowin Karpat Zewnętrznych rozpoznano kilka głębokich nieciągłości sejsmicznych nachylonych na południe. Struktury te są widoczne na odcinku między nasunięciem frontu Karpat a PPS.
3. Serie skalne tworzące PPS są prawie pionowe bezpośrednio poniżej powierzchni terenu, ale głębiej ich nachylenie maleje i PPS zanurza się na południe, pod Tatry i Karpaty Centralne.

Chociaż nasze wyniki są wstępne i eksperyment będzie kontynuowany przez kolejne dwa lata, jego dotychczasowe odkrycia można podsumować następująco.

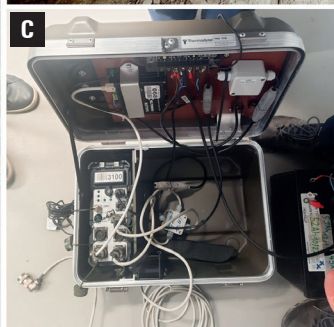
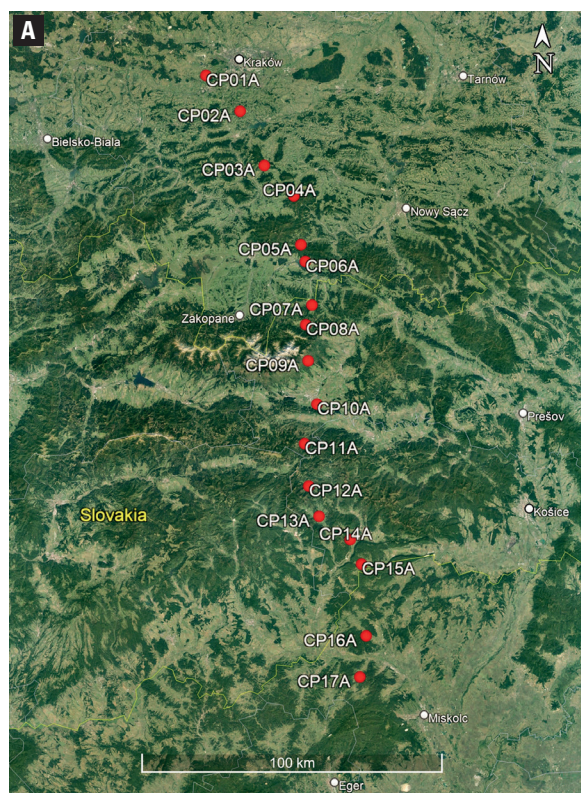
- Po pierwsze, zaburzenie granicy między skorupą a płaszczem ziemskim na odcinku od 100 do 140 km na południe od Krakowa reprezentuje szew tektoniczny między płytą europejską na północy a mikro płytą ALCAPA na południu.

Płytę europejską pogrążającą się stopniowo na południe w płaszczu można obserwować pod Karpatami Centralnymi.

- Po drugie, deformacja związana z nasunięciem Zachodnich Karpat Zewnętrznych nie jest ograniczona jedynie do jednostek osadowych, jak wcześniej sądzono. W podłożu pod płaszczowinami osadowymi Karpat Zewnętrznych istnieją struktury, przypuszczalnie nasunięcia, penetrujące głębokie podłożę płyty europejskiej. Podobna sytuacja została opisana w podłożu basenu wiedeńskiego w rejonie styku Karpat i Alp.
- Po trzecie, PPS jest niemal pionowy jedynie do głębokości około 15 km. Poniżej jego nachylenie maleje i PPS może łączyć się na południu z nasunięciem w podłożu Karpat Centralnych.

Na koniec, środkowa i dolna skorupa bloku ALCA-PA jest na północy wklonowana między górną i dolną skorupę płyty europejskiej. Nie zaobserwowano pozostałości grzbietu czorsztyńskiego na styku między obiema płytami.

Przeprowadzone badania dają nowe spojrzenie na złożoną geologię Karpat Zachodnich, kwestionując wcześniejsze teorie i zapewniając bardziej szczegółowe zrozumienie tektonicznej historii regionu. W miarę jak eksperyment sejsmiczny będzie kontynuowany w kolejnych latach, dalsze dane pomogą doprecyzować model tektoniczny i poznać więcej informacji na temat głębokich struktur, które ukształtowały ten fascynujący fragment Europy. ■



Lokalizacja i konfiguracja stacji sejsmicznych:  
 A) Lokalizacja stacji.  
 B) Stacja w miejscu po rozmieszczeniu.  
 C) Części stacji, takie jak digitizer i router.  
 D) Czujnik