

Maciej J. Mendecki<sup>1</sup>, Leszek Łęczyński<sup>2</sup>, Bogdan Żogała<sup>1</sup>,  
Ryszard Dubiel<sup>1</sup>, Emilia Bubliewska<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Katedra Geologii Stosowanej, Wydział Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet Śląski, Katowice  
<sup>2</sup> Zakład Geofizyki, Instytut Oceanografii, Wydział Oceanografii i Geografii, Uniwersytet Gdański



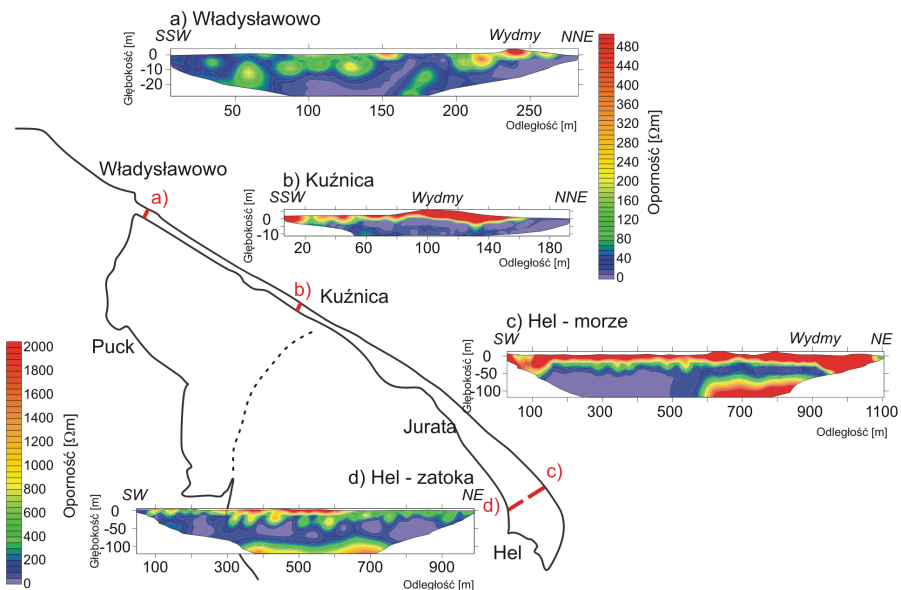
## Geofizyczne rozpoznanie osadów czwartorzędowych Mierzei Helskiej i zasięgu intruzji wód słonych

Obszary wybrzeży morskich i oceanicznych charakteryzują się bardzo specyficznymi strukturami geologicznymi i geomorfologicznymi, gdzie woda słodka oddziałuje z wodą słoną, tworząc wyjątkowy układ dynamiczny opisywany jako strefa ingresji wód słonych. Zjawisko ingresji polega na przemieszczaniu wody słonej w kierunku lądu, gdzie wpływa na zasięg słodkich wód podziemnych w strefie przybrzeżnej. Na granicy wód słonych i słodkich pojawia się strefa mieszania, której zasięg i kształt zależy od gęstości i ciśnienia obu ciał wodnych. Strefa ingresji wód słonych ma duży wpływ na środowisko przybrzeżne, np. zwiększa zasolenie gleb (Goebel i in. 2017; Werner 2017). Zjawisko ingresji szczególnie nasila się w efekcie zmian klimatu, prowadząc do wzrostu poziomu wód morskich, a tym samym wpływając na środowisko wybrzeży morskich (Stewart 1999; Cazenave, Cozannet 2014). Wpływ ingresji wód słonych silnie zaznacza się na obszarach takich jak niewielkie wyspy, atole czy mierzeje, gdzie wody morskie łączą się ze sobą poniżej warstwy wodonośnej. Wynika to ze względnie niewielkiej objętości tych struktur, przez co negatywny wpływ ingresji na środowisko jest bardziej dotkliwy niż w przypadku pozostałych typów wybrzeży.

Taką wyjątkową i unikatową strukturą z ingresją wód słonych po obu stronach jest Półwysep Helski.

Mierzeja Helska jest zbudowana z utworów holocenijskich, głównie polodowcowych i związanych z ewolucją Morza Bałtyckiego. Cały kompleks czwartorzędowych osadów zalega niezgodnie na utworach kredowych. Osady plejstocenijskie mierzei to głównie piaski różnoziarniste z wkładkami żwirów i gliny zwałowe, obecne przede wszystkim w zachodniej części półwyspu. Holocenijskie osady reprezentowane są przez namuły, osady rzeczne i jeziorne oraz preborealne jako materiał ilasty i mułkowy obecny głównie we wschodniej części półwyspu. Proces akumulacji materiału drobnopiaszczystego na stropie osadów jeziora ancylusowego rozpoczął się w trakcie transgresji litorynowej i narastał w kierunku wschodnim, budując dzisiejszą mierzeję. Utwory powierzchniowe to głównie piaski eoliczne i akumulacji morskiej, ale także torfy i namuły obecne w obniżeniach terenu (Sadurski i in. 1987; Krawiec 2013).

Względnie wysoka mineralizacja wód słonych w stosunku do wód słodkich sprawia, że predysponowanymi metodami rozpoznającymi zasięg ingresji są metody geoelektryczne, w szczególności metoda obrazowania oporności 2D (np. Pidlisecky i in. 2016; Vann i in. 2020). Badania przeprowadzono za pomocą metody obrazowania oporności, zwanej również tomografią elektrycznego oporu właściwego (*electrical resistivity tomography*, ERT), która jest rekomendowana do tego typu rozpoznania (Krawiec 2013). Pomiary wykonano, stosując aparaturę LUND IMAGING System firmy ABEM. Pierwszych sześć profili zaprojektowano do płytkiego rozpoznania geologicznego oraz zasięgu ingresji. Najmniejszy rozstaw między elektrodami wyniósł 5 m (ryc. 1), natomiast maksymalna długość zależała od dostępności terenu. Starano się prowadzić profile plaży morskiej do brzegu zatoki. Ostatni profil, siódmy, zaprojektowano tak, aby wykazać generalną budowę poprzeczną Mierzei Helskiej, sięgając głębszych warstw geologicznych. Było to możliwe tylko dlatego, że wschodni koniec mierzei jest na tyle szeroki, aby można było zastosować szerszy rozstaw elektrod (min. 10 m). Skutkowało to głębszym (do głębokości około 130 m p.p.t.) zasięgiem rozpoznania geofizycznego (ryc. 1), jednak wiązało się z utratą rozdzielczości.



Ryc. 1. Wybrane przekroje oporności 2D dla lokalizacji w: a) Władysławowie, b) Kuźnicy, c) Helu od strony morza, d) Helu od strony zatoki. Górna skala oporności dotyczy przekrojów a i b, dolna – c i d; autor: M. Mendecki

Wody słone charakteryzują się bardzo niskimi wartościami oporności ( $< 20 \Omega\text{m}$ ), przez co są relatywnie łatwe do interpretacji na tle eolicznych piasków wydmy i wody słodkiej tworzącej w nich poziom wód gruntowych. Wyróżniono wody brackiczne o opornościach  $20\text{--}50 \Omega\text{m}$  związane ze strefą mieszania się wód słonych i słodkich. Ponadto zakres oporności pokrywa się z wodami Zatoki Puckiej. Wody zatoki w części wschodniej mierzei charakteryzowały się już niższymi opornościami, podobnymi do wód Bałtyku. Wody słodkie interpretowano jako oporności z przedziału  $50\text{--}200 \Omega\text{m}$ . Dolna granica związana jest ze strefą saturacji w piaskach o drobnej frakcji. Wzrost frakcji odzwierciedla wzrost oporności. Suche piaski i grunty zinterpretowano jako anomalie geofizyczne o opornościach większych niż  $200 \Omega\text{m}$ , natomiast eoliczne piaski na wydmach charakteryzują się opornościami powyżej  $400 \Omega\text{m}$  i osiągają wartości kilku tysięcy  $\Omega\text{m}$  (ryc. 1). Płytkie przekroje geofizyczne pokazały, że wody słone z Morza Bałtyckiego łączą się z wodami zatoki. Przestrzenna zmienność intruzji jest bardziej złożona, niż wynika to z prostych

modeli omawianych w literaturze (np. Sadurski i in. 1987; Werner 2017). Granica wód słodkich i słonych (strefa wód brachicznych) jest nieregularna z miejscami ingresji wód słonych bliżej powierzchni i strefami, gdzie woda słodka tworzy większe soczewki. Profil siódmy, przecinający nasadę Półwyspu Helskiego, obrazuje przestrzenne zróżnicowanie głębszych warstw. Ze względu na większą zmienność oporu właściwego niż w przypadku płytkich przekrojów zastosowano szerszą skalę oporności. Do 100  $\Omega\text{m}$  zinterpretowano osady litorinowe zalegające na stropie utworów powstałych w fazie jeziora ancyclusowego. Pod powierzchnią do głębokości około 20–30 m, miejscami do 50 m wyinterpretowano piaski naniesione współcześnie, które stanowią warstwę wodonośną (Sadurski i in. 1987) o opornościach powyżej 1000  $\Omega\text{m}$ . Ze względu na niską rozdzielczość suche piaski eoliczne i zawodnione zostały zinterpretowane jako jedna warstwa geofizyczna. Profil siódmy wskazał, że budowa geologiczna jest złożona i dokumentuje przebieg granicy osadów holocenicznych.

Cazenave A., Cozannet G.L., 2014. Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2, 2, 15–34.

Goebel M., Pidlisecky A., Knight R., 2017. Resistivity imaging reveals complex pattern of saltwater intrusion along Monterey coast. *Journal of Hydrology*, 551, 746–755.

Krawiec A., 2013. *Pochodzenie anomalii chlorkowych w wodach podziemnych polskiego wybrzeża Bałtyku*, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń.

Pidlisecky A., Moran T., Hansen B., Knight R., 2016. Electrical resistivity imaging of seawater intrusion into the Monterey Bay aquifer system. *Groundwater*, 54, 2, 255–261.

Sadurski A., Borawska J., Burczyk T., 1987. Warunki hydrogeologiczne i hydrochemiczne Mierzei Helskiej. *Kwartalnik Geologiczny*, 31, 4, 767–782.

Stewart M.T., 1999. Geophysical investigations, [w:] J. Bear, A. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, I. Herrera (red.), *Seawater intrusion in coastal aquifers – Concepts, methods and practices*, Springer Science & Business Media, Dordrecht, 9–50.

Vann S., Puttiwongrak A., Suteerasak T., Koedsin W., 2020. Delineation of seawater intrusion using geo-electrical survey in a coastal aquifer of Kamala Beach, Phuket, Thailand. *Water*, 12, 2, 506.

Werner A.D., 2017. On the classification of seawater intrusion. *Journal of Hydrology*, 551, 619–631.