



## OPIS PROJEKTU

### **Perma-deszcz: wpływ opadów deszczu na uwalnianie węgla organicznego z permafrostu w Dalekiej Arktyce**

#### **Tematyka doktoratu: Rola opadów deszczu w kształtowaniu bilansu wodnego i eksportu węgla organicznego w zlewni arktycznej z permafrostem**

Zlewnie arktyczne należą do obszarów szczególnie wrażliwych na skutki postępujących zmian klimatycznych. Ocieplenie klimatu zachodzi w Arktyce około 3-4-krotnie szybciej, niż gdzie indziej na kuli ziemskiej (Rantanen i in., 2022) i prowadzi do szeregu zmian środowiskowych. Jednym z kluczowych procesów jest zmiana reżimu opadowego (Bintanja i Andry, 2017; Bintanja, 2018; McCrystall i in., 2021). Obserwowane wyraźne trendy wzrostowe średniej temperatury powietrza, wzrost udziału opadów deszczu oraz coraz częstsze występowanie opadu ciekłego podczas sezonu zimowo-wiosennego w Arktyce (Bintanja i Andry, 2017), powodują ewolucję reżimu hydrologicznego ze zdominowanego przez topnienie śniegu w kierunku reżimu deszczowo-śnieżnego. Procesy te mają istotne konsekwencje dla funkcjonowania niewielkich zlewni arktycznych (stanowiących 99% zlewni w dorzeczu Oceanu Arktycznego), wpływając zarówno na dynamikę odpływu, procesy mobilizacji i transportu węgla organicznego, jak i na stabilność permafrostu. Wieloletnia zmarzlina zajmuje około 25% powierzchni lądów na półkuli północnej i jest rezerwuarem ogromnych zasobów węgla organicznego zmagazynowanego w przeszłości – stanowiących w przybliżeniu dwukrotność zasobów węgla atmosferycznego (Miner i in., 2022). Opady deszczu stanowią ważny czynnik skutecznie przyczyniający się do jej rozmarzania (Magnússon i in., 2022).

Przyspieszane przez opady deszczu topnienie wieloletniej zmarzliny może prowadzić zarówno do zwiększenia łączności hydraulicznej pomiędzy warstwą czynną permafrostu i ciekami, jak również prowadzić do intensyfikacji i zróżnicowania wymywania węgla glebowego (Fouché i in., 2025). Procesy te mogą

w konsekwencji mobilizować znaczne ilości węgla organicznego zmagazynowanego w zamrzniętych gruntach, przy czym ich przebieg oraz intensywność może być uzależniona zarówno od sumy opadów, jak i od różnych właściwości opadów lub wody opadowej (Repasch i in., 2024).

Pomimo rosnącego zainteresowania wpływem zmian klimatycznych na funkcjonowanie środowiska arktycznego ze względu na zaburzenia cyklu węglowego związanego z rozmarzaniem gruntów i uwalnianiem dawnego węgla (Martens i in., 2022; Tank i in., 2023; Vonk i in., 2023, 2025), rola opadów deszczu w mobilizacji oraz transporcie węgla organicznego z permafrostu nie została dotąd szczegółowo zbadana. Wynika to przede wszystkim z trudności związanych z rejestracją i badaniem właściwości opadu w warunkach arktycznych, identyfikacją źródeł pochodzenia i skupisk węgla oraz prowadzeniem kompleksowych analiz próbek. Nieznany jest także wpływ opadów deszczu pojawiających się w okresie zimowo-wiosennym, jak również rola arktycznych rzek przybrzeżnych odwadniających małe zlewnie i dostarczających ładunki węgla bezpośrednio do Oceanu Arktycznego. Precyzyjne zrozumienie wpływu sumy opadów deszczu, jego właściwości oraz skutków na odpływ rozpuszczonego węgla organicznego (RWO; ang. DOC - dissolved organic carbon) jest istotne dla przewidywania przyszłego eksportu RWO, jego wpływu na klimat i procesy biogeochemiczne. Procesy te mogą mieć istotne skutki również dla zamieszkałych obszarów Arktyki, oddziałując na jakość wody pitnej oraz stan ekosystemów (w tym kondycję zdrowotną ryb, będących tradycyjnym źródłem żywności).

Projekt koncentruje się na określeniu roli opadów deszczu w obiegu węgla organicznego (przede wszystkim w postaci rozpuszczonej) w zlewni w Dalekiej Arktyce na podłożu wieloletniej zmarzliny. Szczególna uwaga zostanie poświęcona zrozumieniu zależności pomiędzy degradacją kriosfery a cyklem hydrologicznym i obiegiem węgla. Aby uwzględnić znaczne zróżnicowanie warunków panujących w zlewniach arktycznych i szczególnie określić źródła eksportu węgla organicznego analizie poddana zostanie nie tylko zlewnia w ujęciu całościowym, ale również zlewnie zagnieżdżone w jej obrębie. Problematyka badań ma charakter interdyscyplinarny i wymaga połączenia wiedzy z zakresu m.in. hydrologii (w tym

modelowania hydrologicznego), hydrochemii, geochemii środowiska, gleboznawstwa, geomorfologii oraz analizy przestrzennej z zastosowaniem GIS.

Badania będą realizowane w niewielkiej, w znacznej mierze niezłodowaconej zlewni arktycznej, charakteryzującej się bezpośrednim odpływem do systemu przybrzeżnego oraz obecnością permafrostu. W ramach prac terenowych prowadzone będą pomiary hydrologiczno-meteorologiczne obejmujące monitoring ilościowy i jakościowy opadów atmosferycznych, wód płynących oraz reakcji zlewni na zdarzenia opadowe za pomocą rejestratorów i próbników automatycznych. Dodatkowo pobierane będą również manualnie próbki śniegu oraz wody opadowej, rzecznej i glebowej. Łącznie, prace te umożliwią kompleksową analizę transportu węgla od źródeł do ujścia zlewni w trakcie całego sezonu hydrologicznego. W warunkach laboratoryjnych wykonywane będą oznaczenia stężeń rozpuszczonego i zawieszonego (cząsteczkowego) węgla organicznego (RWO i ZWO ang. POC - particulate organic carbon lub SOC - suspended organic carbon), co pozwoli na ilościowe określenie eksportu węgla ze zlewni. Dodatkowo analizowane będą podstawowe parametry fizykochemiczne wody, takie jak temperatura, pH oraz przewodność elektryczna właściwa (SpC), planowane jest również wykorzystanie analiz spektrofluorometrycznych w postaci macierzy wzbudzenia emisji (ang. EEMs - excitation-emission matrices), umożliwiających rozróżnienie głównych typów materii organicznej. Istotnym elementem projektu będzie także analiza geoprzestrzenna z wykorzystaniem narzędzi GIS, służąca ocenie wpływu czynników środowiskowych na dynamikę transportu węgla i jego zróżnicowanie przestrzenne.

Kluczowym elementem, integrującym wszystkie etapy badań, będzie analiza związków pomiędzy opadem i odpływem a eksportem węgla organicznego. Pozwoli to na ilościowe opisanie bilansu wodnego i eksportu węgla organicznego ze zlewni oraz identyfikację czynników warunkujących jego zmienność w skali sezonu hydrologicznego, w tym opóźnionych w czasie zjawisk będących konsekwencją opadu występującego wcześniej w tym samym sezonie hydrologicznym. Szczególna uwaga zostanie poświęcona analizie poszczególnych epizodów opadowych oraz właściwości wody opadowej, ich udziału w całkowitym eksporcie węgla organicznego w skali roku, skutkom oraz

odpowiedzi systemu hydrologicznego na zmienne warunki wodne w obrębie zlewni. Ponadto, w celu zapewnienia możliwości uogólnienia badań na inne zlewnie w Dalekiej Arktyce, planowane jest przeprowadzenie analiz porównawczych w obrębie drugiej zlewni arktycznej, różniącej się zasobami węgla, warunkami geologicznymi oraz zasięgiem pokrywy roślinnej. Badania mogą przyczynić się do wypełnienia dotychczasowych luk badawczych i lepszego zrozumienia wpływu zmieniającego się reżimu opadowego Arktyki na funkcjonowanie systemów hydrologicznych i obiegu węgla w zlewniach arktycznych.

#### Literatura:

- Bintanja, R. (2018). The impact of Arctic warming on increased rainfall. *Sci. Rep.* 8. doi:10.1038/s41598018-34450-3.
- Bintanja, R., and Andry, O. (2017). Towards a rain-dominated Arctic. *Nat. Clim. Chang.* 7, 263–267. doi:10.1038/nclimate3240.
- Fouché, J., Hirst, C., Bonneville, S., Opfergelt, S., Haghypour, N., Eglinton, T. I., et al. (2025). Rainfall Impacts Dissolved Organic Matter and Cation Export From Permafrost Catchments and a Glacial River During Late Summer in Northeast Greenland. *Permafr. Periglac. Process.* 36, 3–21. doi:10.1002/ppp.2250.
- Magnússon, R., Hamm, A., Karsanaev, S. V., Limpens, J., Kleijn, D., Frampton, A., et al. (2022). Extremely wet summer events enhance permafrost thaw for multiple years in Siberian tundra. *Nat. Commun.* 13. doi:10.1038/s41467-022-29248-x.
- Martens, J., Wild, B., Semiletov, I., Dudarev, O. V., and Gustafsson, Ö. (2022). Circum-Arctic release of terrestrial carbon varies between regions and sources. *Nat. Commun.* 13. doi:10.1038/s41467-022-33541-0.
- McCrystall, M. R., Stroeve, J., Serreze, M., Forbes, B. C., and Screen, J. A. (2021). New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected. *Nat. Commun.* 12. doi:10.1038/s41467-021-27031-y.
- Miner, K. R., Turetsky, M. R., Malina, E., Bartsch, A., Tamminen, J., McGuire, A. D., et al. (2022). Permafrost carbon emissions in a changing Arctic. *Nat. Rev. Earth Environ.* 3, 55–67. doi:10.1038/s43017-021-00230-3.
- Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., et al. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.* 3, 168. doi:10.1038/s43247-022-00498-3.
- Repasch, M., Acuri, J., Vereem, I., Anderson, S., Anderson, R., and Koch, J. (2024). Impacts of convective storms on runoff, erosion, and carbon export in a continuous permafrost landscape. doi:10.52381/ICOP2024.104.1.
- Tank, S. E., McClelland, J. W., Spencer, R. G. M., Shiklomanov, A. I., Suslova, A., Moatar, F., et al. (2023). Recent trends in the chemistry of major northern rivers signal widespread Arctic change. *Nat. Geosci.* 16, 789–796. doi:10.1038/s41561-023-01247-7.
- Vonk, J. E., Fritz, M., Speetjens, N. J., Babin, M., Bartsch, A., Basso, L. S., et al. (2025). The land-ocean Arctic carbon cycle. *Nat. Rev. Earth Environ.* 6, 86–105. doi:10.1038/s43017-024-00627-w.
- Vonk, J. E., Speetjens, N. J., and Poste, A. E. (2023). Small watersheds may play a disproportionate role in arctic land-ocean fluxes. *Nat. Commun.* 14. doi:10.1038/s41467-023-39209-7.