

## Streszczenie w języku polski

Nadbrzeżne ekotony (strefy buforowe) to bariery biogeochemiczne położone na styku ekosystemów lądowych i wodnych, które odgrywają kluczową rolę w ograniczaniu transportu zanieczyszczeń obszarowych w zlewniach rolniczych. W ramach pracy doktorskiej analizowano efektywność pięciu stref ekotonowych w postaci ekstensywnie użytkowanych, wąskich łąk położonych między gruntami ornymi a ciekami. Czteroletnie badania wykazały, że strefy są skutecznym narzędziem do redukcji stężenia azotanów i fosforanów z silnie zanieczyszczonego spływu podpowierzchniowego. W przypadku fosforanów skuteczność ekotonów była zmienna i uzależniona od stężenia dopływającego do strefy. Wyniki uzyskane dla wysokich stężeń (powyżej 1,5 mg PO<sub>4</sub>/l) wykazały wysoką 81% efektywność strefy o szerokości 45 m oraz 76% w przypadku 47 metrowego ekotonu. Usuwanie fosforu z wody w trakcie przepływania przez strefę buforową odbywa się m.in. w wyniku procesu adsorpcji związków fosforu przez cząsteczki gleby. Obecność wysokich stężeń może wiązać się z potencjalnym ryzykiem przekroczenia krytycznego stopnia nasycenia fosforem i wtórnym zanieczyszczeniem wód, jednakże badane strefy buforowe nie wykazały oznak wyczerpania się pojemności sorpcyjnej.

Nadbrzeżne ekotony ze względu na ich wielofunkcyjny charakter zostały zakwalifikowane jako rozwiązania oparte na zasobach przyrody (ang. *nature-based solution*). W obliczu intensyfikacji rolnictwa przekładającej się na intensyfikację produkcji, zwiększone nawożenie czy ekspansję gruntów ornich konieczne staje się poszukiwanie rozwiązań dla zwiększenia efektywności roślinnych stref. Odpowiedzią na zaistniałe zapotrzebowanie są wywodzące się z trzeciej zasady ekohydrologii (Zalewski i in. 1997) biotechnologie ekohydrologiczne (Zalewski 2014), w tym wysokoefektywne strefy ekotonowe.

Wzmocnienie efektywności stref buforowych poprzez intensyfikację procesu adsorpcji fosforu w glebie stanowiło punkt wyjścia dla opracowania prototypowej instalacji w postaci wysokoefektywnej strefy ekotonowej, w której naturalne procesy zachodzące w roślinnej strefie buforowej zostały wzmocnione poprzez skonstruowanie bariery na bazie wapienia. W trakcie przepływu wód przez barierę zachodzi m.in. adsorpcja fosforu na powierzchni wapienia oraz strącanie fosforu z jonami wapnia i tworzenie nierozpuszczalnych fosforanów wapnia. Materiały wiążące fosfor zawierające wapń są odpowiednie do stosowania w ekosystemach wodnych, ponieważ wiązanie fosforu z wapniem nie jest osłabiane przez cykle redukcyjno-utleniające. W okresie inicjowania pracy

złoża stwierdzono 58% redukcję stężenia fosforanów w wodach pierwszej warstwy wodonośnej w wyniku przepłynięcia przez skonstruowaną barierę. W okresie 3,5 letniej eksploatacji przy wysokim obciążeniu związkami fosforu złoża wapienne wykazało zmienną efektywność w usuwaniu fosforu fosforanowego i fosforu rozpuszczonego. Efektywność zależna była od stężenia dochodzącego, które w przypadku fosforu rozpuszczonego wahało się w zakresie od 0,68 do 9,42 mg P/l. Zaobserwowane ekstremalne obciążenie złoża związkami fosforu, porównywalne do ładunków notowanych na oczyszczalniach ścieków komunalnych, mogło być głównym czynnikiem limitującym długość eksploatacji złoża. Ze względu na ograniczony czas życia bariery konieczna jest adaptacja techniki budowy pozwalająca na łatwą wymianę złoża wapiennego, jak również dalsze prace nad substratem wykorzystanym w złożu, aby dostosować i udoskonalić rozwiązania do specyfiki obciążenia.

W celu skutecznego ograniczenia zanieczyszczeń obszarowych z terenów wiejskich rozwiązania oparte na wykorzystaniu naturalnych procesów, w tym biotechnologie ekohydrologiczne, powinny być wdrażane w skali zlewni. Opracowana mapa drogowa systemowego podejścia do włączenia rozwiązań opartych na zasobach przyrody w zlewniowe zarządzanie zasobami wodnymi zastała przetestowana w trakcie opracowania „Planu działań na rzecz ograniczenia zanieczyszczeń obszarowych w zlewni Pilicy powyżej Zbiornika Sulejowskiego”. Systemowe podejście opiera się na wykorzystaniu wyników mapowania emisji substancji biogenicznych przy pomocy modelu SWAT oraz połączeniu ich z szeroko zakrojonymi konsultacjami z zainteresowanymi stronami. Wyniki modelowania zawężyły obszar zlewni Pilicy do ok. 6,6% powierzchni zlewni i 16,3% gruntów ornych położonych w zlewni, który wymaga dedykowanych działań naprawczych. Lista ukierunkowanych działań naprawczych będąca wynikiem wspólnych prac z interesariuszami projektu zawiera rozwiązania oparte na zasobach przyrody, w tym biotechnologie ekohydrologiczne, które zostały zastosowane w skali zlewni jako narzędzia komplementarne i synergiczne do dobrych praktyk rolniczych.

*Wojciech Fajpach*

## Streszczenie w języku angielskim

Riparian ecotones (buffer zones) are biogeochemical barriers located at the interface between terrestrial and aquatic ecosystems, that play a key role in limiting the transport of diffuse pollutants in agricultural catchments. Within the framework of this dissertation, the effectiveness of five ecotone zones in the form of extensively used narrow meadows located between arable land and watercourses was analysed. The four-year study showed that the zones are an effective tool for reducing nitrate and phosphate concentrations from heavily polluted subsurface runoff. For phosphate, the effectiveness of ecotones was variable and dependent on the concentration flowing into the zone. Results for high concentrations (above 1.5 mg PO<sub>4</sub>/l) showed a high 81% efficiency for a 45 m wide zone and 76% for a 47 m wide ecotone. The removal of phosphorus from the water as it passes through the buffer zone is due in part to the adsorption of phosphorus by soil particles. The presence of high concentrations may be associated with a potential risk of exceeding a critical phosphorus saturation level and secondary water pollution; however, the buffer zones studied showed no signs of sorption capacity depletion.

Riparian ecotones have been classified as nature-based solutions due to their multifunctional character. In the face of intensification of agriculture which translates into intensification of production, increased fertilization, or expansion of arable land, it becomes necessary to look for solutions that would increase the effectiveness of vegetated zones. Ecohydrological biotechnologies derived from the third principle of ecohydrology (Zalewski et al. 1997), including highly effective ecotone zones, are the answer to this need.

Enhancement of buffer zone efficiency by intensifying the process of phosphorus adsorption in soil was the starting point for the development of a prototype installation in the form of a highly efficient ecotone zone where natural processes occurring in the plant buffer zone were enhanced by constructing a limestone-based barrier. During the flow of water through the barrier, processes such as the adsorption of phosphorus on the limestone surface, the precipitation of phosphorus with calcium ions, and the formation of insoluble calcium phosphates take place. Calcium-containing phosphorus-binding materials are suitable for use in aquatic ecosystems because the binding of phosphorus to calcium is not impaired by reduction-oxidation cycles. During the deposit initiation period, a 58% reduction in phosphate concentration was observed in waters of the first aquifer as a result of flowing through the constructed barrier. During 3.5 years of operation at high phosphorus loading, the limestone

bed showed variable efficiency in removing phosphate phosphorus and dissolved phosphorus. The efficiency depended on the incoming concentration, which for dissolved phosphorus ranged from 0.68 to 9.42 mg P/l. The observed extreme loading of the bed with phosphorus compounds, comparable to loads recorded at municipal wastewater treatment plants, may have been the main factor limiting the length of bed operation. Due to the limited life of the barrier, adaptation of the construction techniques to allow easy replacement of the limestone bed is necessary, as well as further work on the substrate used in the bed to adapt and improve the solutions to the specific loadings.

In order to effectively reduce diffuse pollution from rural areas, measures based on the use of natural processes, including ecohydrological biotechnologies, should be implemented at the catchment scale. The developed roadmap for a systemic approach to incorporate nature-based solutions into catchment-scale water resources management was tested during the development of the "Action Plan for Reducing Diffuse Pollution in the Pilica River Basin Above the Sulejów Reservoir". The systematic approach is based on using the results of nutrient emission mapping with the SWAT model and combining them with extensive stakeholder consultations. The modelling results narrowed down the Pilica catchment area to about 6.6% of the catchment area and 16.3% of the arable land located in the catchment, which requires dedicated mitigation measures. The list of targeted mitigation measures resulting from the joint work with project stakeholders includes nature-based solutions, including ecohydrological biotechnologies, which were applied at the catchment scale as complementary and synergistic tools to good agricultural practices.

*Wojciech Fijałkowski*