

# Eksperyment manipulacyjny jako narzędzie oceny wpływu zmian klimatycznych na emisję CO<sub>2</sub> z torfowiska

*B.H. Chojnicki, K.M. Harenda, M. Samson, S. Słowińska, M. Słowiński, M. Lamentowicz, J. Barabach, M. Zielińska, V.E.J. Jassey, A. Buttler, M. Stróżecki, J. Leśny, M. Urbaniak, D. Józefczyk, R. Juszczak*

**Abstrakt.** W warunkach zmieniającego się klimatu wiedza na temat reakcji ekosystemów na wzrost temperatury oraz zaburzenia stosunków hydrologicznych staje się kluczowa dla ich ochrony. Zagadnienie to dotyczy szczególnie ekosystemów wrażliwych na wszelkie zmiany środowiskowe, jakimi są tereny podmokłe. Torfowiska, będące olbrzymim rezerwuarem wody i węgla, stanowią bardzo istotny element globalnego obiegu węgla w przyrodzie, a ich reakcja na wzrost temperatury i susze może przynieść katastrofalne skutki dla globalnego klimatu. Dlatego naukowcy na całym świecie starają się przewidzieć reakcję tych ekosystemów m. in. przy pomocy tzw. eksperymentów manipulacyjnych. W Polsce takie manipulacje przeprowadzono na torfowiskach Linje i Rzecin. W niniejszej pracy dokonano przeglądu dostępnych technik manipulacyjnych, które stosuje się obecnie podczas badań realizowanych w warunkach terenowych. Zestawienie charakterystyk technicznych, ekonomicznych oraz organizacyjnych poszczególnych technik, wywołujących wzrost temperatury oraz zmiany warunków hydrologicznych, może posłużyć jako wsparcie dla naukowców planujących badania reakcji ekosystemów na nadchodzące zmiany klimatu.

**Słowa kluczowe:** torfowisko, zmiany klimatu, dwutlenek węgla, eksperyment manipulacyjny

**Abstract. Manipulation experiment as a tool for the study of climate change impact on peatlands CO<sub>2</sub> emission.** Knowledge about the response of ecosystems to temperature increase and disturbance in the water balance underlies realistic future landscape protection policy. This is especially true for ecosystems that are sensitive to changing environmental conditions, like peatlands. Peatlands are huge reservoirs of terrestrial carbon and water, and hence are very important ecosystem in the global carbon cycle. Their response to predicted future increase in temperature and changes in the water balance changes can have catastrophic consequences for the global climate. To study and predict the effects of climate change on peatland processes like the carbon cycle, environmental scientists use climate manipulation experiments. Poland hosts two of these experiments, one in the proximity of Linje, one near Rzecin. This paper reports the techniques used at these climate manipulation experiments, that brings together scientists from across Europe. By providing a full overview on all technical, economical, and organizational aspects of both experiments, this paper may be of future reference to likewise research initiatives in peatlands.

**Key words:** peatland, climate change, carbon dioxide, manipulation experiment

## Wstęp

Zmiany klimatyczne stanowią obecnie wyzwanie dla całej ludzkości (IPCC 2014). Ich globalny charakter sprawił, iż naukowcy próbują odpowiedzieć na pytanie dotyczące skutków, jakie pociągną za sobą te zmiany między innymi w funkcjonowaniu ekosystemów. Na szczególną uwagę zasługują tu tereny podmokłe, które stanowią olbrzymi rezerwar nie tylko wody, ale także węgla. Ocenia się, że obecnie w torfowiskach zgromadzone jest 270–547 Pg węgla (Clymo i in. 1998, Turunen et al. 2002), a ok. 30% węgla glebowego zgromadzone jest w środowiskach podmokłych północnej półkuli (Gorham 1991). Pierwiastek ten był akumulowany w uwodnionym środowisku torfowisk przez tysiące lat i proces ten, w wielu miejscach, trwa nadal. Dzięki fotosyntezie rośliny torfowiskowe pozyskują węgiel z atmosfery, który służy między innymi do budowy ich tkanek. Po obumarciu ich szczątki trafiają do uwodnionego (beztlenowego) środowiska, gdzie ulegają konserwacji, tworząc torf. Wzrost roślin oraz stałe uwilgotnienie stanowią podstawę procesu torfotwórczego. Dzięki niemu martwa biomasa przechowana jest przez tysiące lat, a węgiel w niej zgromadzony jest skutecznie usunięty z obiegu tego pierwiastka w przyrodzie (Tobolski 2003, de Jong i in. 2010).

Działalność ludzka, np. osuszanie lub wypalanie torfowisk w celu utworzenia terenów uprawnych (Hooijer i in. 2010), czy wykorzystywanie torfu do celów energetycznych (Waddington i in. 2000), sprawiła, że węgiel znajdujący się w torfie jest uwalniany, postaci  $\text{CO}_2$ , z powrotem do atmosfery. Przyrost stężenia tego gazu w atmosferze jest najważniejszą przyczyną wzrostu globalnej temperatury. Ogrzewanie się atmosfery wpłynie także na lokalne bilanse wodne (IPCC2014). W ten sposób funkcjonowanie torfowisk, środowisk szczególnie czułych na zmiany reżimu hydrologicznego, może ulec radykalnej zmianie.

Projekcje warunków klimatycznych dla Polski zapowiadają wzrost temperatury powietrza przy jednoczesnym braku zmiany lub spadku wielkości opadów (Juszczak i in. 2013). Przewidzenie reakcji torfowisk na te zmiany jest jednym z podstawowych zagadnień badawczych ostatnich lat (Lamentowicz i in. 2016), a jednym ze sposobów na określenie tej reakcji są terenowe eksperymenty manipulacyjne (Baier i in. 2004). Manipulacje te polegają na modyfikacji parametrów środowiska w taki sposób, aby nowe warunki już dziś przypominały te przewidywane w przyszłości. Dzięki takim zabiegom możliwe jest przewidywanie zmian w funkcjonowaniu środowisk i tym samym określenie reakcji zbiornika węgla glebowego na zmiany klimatyczne (Crowther i in. 2016). W Polsce od 2012 roku prowadzone są dwa eksperymenty manipulacyjne CLIMPEAT ([www.climpeat.pl](http://www.climpeat.pl)) i WETMAN ([www.wetman.pl](http://www.wetman.pl)), których głównym celem jest ocena reakcji torfowisk na nadchodzące zmiany klimatyczne. Celem niniejszej pracy jest przegląd, a także omówienie wad oraz zalet metod manipulacji temperaturą i opadem stosowanych w warunkach terenowych.

## Techniki podnoszenia temperatury

Obserwowany wzrost temperatury na Ziemi wynika z modyfikacji jej bilansu cieplnego. Ocieplenie jest przede wszystkim skutkiem intensyfikacji zjawiska efektu szklarniowego. Jednak w eksperymentach manipulacyjnych wzrost intensywności efektu szklarniowego w ścisłym tego słowa znaczeniu nie jest możliwy. Lokalny wzrost temperatury uzyskiwany

jest w oparciu o zjawiska imitujące ten efekt. Stosowane techniki można podzielić na dwie grupy metod: pasywne i aktywne (Aronson i McNulty 2009).

## Metody pasywne

Metody pasywne polegają na modyfikacji parametrów fizycznych atmosfery nad powierzchnią czynną, której skutkiem jest zmiana wielkości składników bilansu cieplnego powierzchni czynnej, a ty samym zmiana jej temperatury.

### Technika komory otwartej

Manipulacja ta realizowana jest przez zastosowanie w terenie komory otwartej od góry (ang. Open Top Chamber – OTC), której pochylone przezroczyste ścianki powodują m.in. redukcję prędkości wiatru nad powierzchnią badawczą (Ryc. 1). Ta modyfikacja sprawia, iż wielkość wymiany zarówno pary wodnej, jak i ciepła między powierzchnią czynną a atmosferą ulega redukcji. Zmniejszona w ten sposób wymiana cieplna sprawia, iż temperatura wewnątrz komory wzrasta (Marion i in. 1997). Innymi słowy, ciepło w słoneczny dzień jest „przytrzymywane” przy powierzchni torfowiska powodując jej dodatkowe podgrzanie. Otwarta górna część komory pozwala na dotarcie do powierzchni opadów atmosferycznych. Dzięki temu ilość wody dostępnej dla roślin wewnątrz komory jest taka sama jak poza nią.

Ten rodzaj manipulacji temperaturą może być także realizowany przy pomocy małych szklarni czy plastikowych namiotów. Badacze jednak, w oparciu o doświadczenia zdobyte w ramach Międzynarodowego Projektu Tundrowego (ang. International Tundra Experiment – ITEx), wypracowali standard konstrukcyjny komór otwartych (Shaver i in. 2000), który jest stosowany w różnych miejscach na Ziemi (Buttler i in. 2015, Lamentowicz i in. 2016). Komory te wykonane są ze sztucznego tworzywa bądź innego przezroczystego materiału a ich podstawa ma kształt koła bądź sześciokąta. Niektórzy badacze sugerują zastosowanie wentylatorów dla poprawienia jednorodności temperatury wewnątrz komory (Norby i in. 1997), jednak taka modyfikacja sprawia, iż zarówno konstrukcja jak i utrzymanie instalacji staje się trudniejsze technicznie i bardziej kosztochłonne.



**Ryc. 1.** Schemat działania komory otwartej (strzałki okrągłe – turbulencja, strzałki czarne pogrubione – efekt ogrzewania, strzałki niebieskie – transport pary wodnej, strzałki czerwone – transport ciepła)  
*Fig. 1. Field warming with Open Top Chamber (OTC) where: circle arrows – turbulence, thick arrows – warming effect, blue arrows – water vapor vertical transport, red arrows – heat vertical transport*

## Technika markizy refleksyjnej

Nocą, temperatura powierzchni ziemi spada z powodu utraty ciepła drogą promieniowania długofalowego. Ograniczenie wielkości tej emisji można dokonać poprzez instalację nad gruntem markizy refleksyjnej, która będzie odbijać to promieniowanie z powrotem do podłoża (Emmett i in. 2004). Materiał, z którego zrobiona jest markiza, to zwykle tkanina wykonana z włókien szklanych i poliestrowych pokryta folią aluminiową (emisyjność 0,03) od strony gruntu (Łlusia i in. 2006). To ruchome zadaszenie rozwijane jest nad powierzchnią w okresie nocnym. Nocą, markiza składana jest jedynie w czasie opadów, aby nie ograniczać dopływu wody, oraz w warunkach zbyt silnego wiatru, z powodu którego może ulec uszkodzeniu. Zadaszenie jest składane wraz ze wschodem słońca, aby umożliwić dostęp promieniowania słonecznego do stanowiska badawczego. Chociaż koszt budowy samej markizy nie jest zbyt wysoki, to system kontrolujący jej działanie musi być wyposażony w czujniki: opadu, prędkości wiatru oraz promieniowania.



**Ryc. 2.** Schemat działania markizy refleksyjnej (wążykowate strzałki – promieniowanie długofalowe, strzałki pogrubione – efekt ogrzewania)

*Fig. 2. Passive nighttime warming with Infrared-reflective curtain, where: tortuous arrows – Infrared radiation, thick arrows – warming effect*

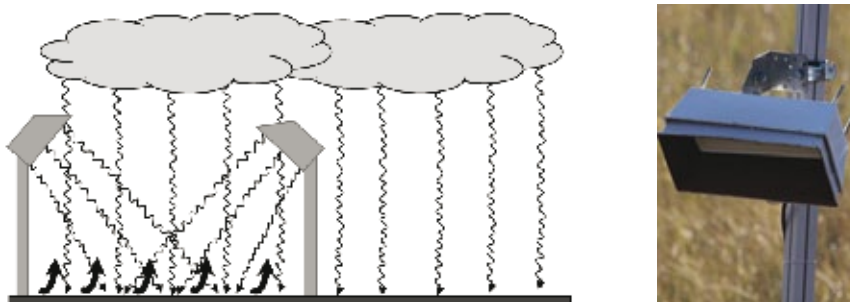
Taki zabieg manipulacyjny zdaje się dobrze imitować globalny wzrost temperatury, albowiem spora część projekcji klimatycznych wskazuje na wzrost temperatury właśnie nocą. Instalacja tej markizy możliwa jest nawet nad wysokimi roślinami takimi jak drzewa, jednak wymaga zastosowania kratownicy wzmacniającej (Luxmoore i in. 1998). Zastosowanie zadaszenia refleksyjnego jest jednak ograniczone na terenach znajdujących się na wyższych szerokościach geograficznych, albowiem aby uzyskać efekt dodatkowego ogrzania powierzchni potrzebna jest odpowiednio duża ilość energii promieniowania słonecznego (Aronson i McNulty 2009).

## Metody aktywne

Drugą grupą metod podnoszenia temperatury powierzchni są metody aktywne i polegają one na dostarczeniu dodatkowej energii, w postaci promieniowania lub ciepła, do powierzchni poddanej manipulacji termicznej.

## Technika promiennika podczerwieni

Promieniowanie długofalowe nieba stanowi ważny element bilansu cieplnego powierzchni czynnej. Ten strumień energii (promieniowanie zwrotne atmosfery) m.in. redukuje tempo spadku temperatury powierzchni w pochmurne noce. Zastosowanie promienników podczerwieni, jako dodatkowego źródła promieniowania długofalowego docierającego do powierzchni, imituje przewidywany wzrost promieniowania atmosfery (Ryc. 3). Elementy emitujące podczerwień umieszczone są zwykle na wysokości ok. 1 m nad ogrzewaną powierzchnią, a energia przez nie wydzielana dociera do roślinności oraz, jeśli to możliwe, do powierzchni gleby znajdującej się pod okapem roślin (Harte i in. 1995).



**Ryc. 3.** Schemat działania promiennika podczerwieni (wężykowane strzałki – promieniowanie długofalowe, strzałki grube – efekt ogrzewania) (po lewej); promiennik podczerwieni model Elstein HTS/1 (po prawej) – eksperyment WETMAN, Rzecin, Polska (fot. B.H. Chojnicki)

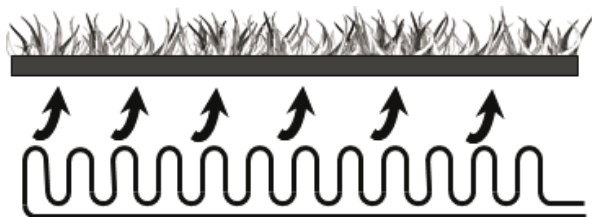
*Fig. 3. Active warming with infrared lamps, where: tortuous arrows – infrared radiation, thick arrows – warming effect (left); infrared lamp model Elstein HTS/1 (right) – WETMAN experiment, Rzecin, Poland*

Sam promiennik podczerwieni jest zwykle ceramiczną, kwarcową lub metalową lampą zaopatrzoną często w reflektory pozwalające na ukierunkowanie emitowanego promieniowania. Ze względu na źródła ich zasilania można wyróżnić trzy typy promienników: gazowe, elektryczne oraz wodne.

## Technika kabla grzejnego

Kolejny typ ogrzewania powierzchni ekosystemu polega na zastosowaniu kabla grzejnego jako źródła ciepła. Taki kabel można zainstalować zarówno nad pokrywą roślinną (będzie pełnił wtedy rolę promiennika podczerwieni), jak i bezpośrednio na lub pod powierzchnią gruntu (Ryc. 4). W obu przypadkach manipulacja ta zakłada, skąd inąd słusznie z fizycznego punktu widzenia, że źródłem ciepła w atmosferze jest powierzchnia ziemi. Umieszczenie kabla na powierzchni gruntu może wpłynąć, poprzez bezpośrednie ogrzewanie, na rozwój roślinności. Aby uniknąć kontaktu kabla z roślinami, jest on często wplatany w siatkę, która gwarantuje odpowiedni dystans między roślinami a przewodem (Fitter i in. 1999). Zainstalo-

wanie kabla w gruncie (na głębokości nie większej niż 5 cm) (Bergh i Linder 1999) powoduje często duże zaburzenie w populacjach mikroorganizmów glebowych. Dlatego też, często stosuje się równoległe powierzchnie kontrolne, gdzie instaluje się podobny kabel, ale nie uruchamia się ogrzewania (Peterjohn i in. 1994). Ręczna regulacja ilości emitowanej przez instalację energii jest niemożliwa, a to wymusza zastosowanie automatycznego systemu kontrolnego. Mimo zaburzenia wywołanego przez instalację kabla grzejnego w środowisku glebowym, instalacja ta posiada niewątpliwą zaletę, albowiem pozwala na dokładną kontrolę temperatury gruntu. Technika ta jest także krytykowana za przestrzenną niehomogeniczność termiczną ogrzewanej powierzchni. Opisane wcześniej metody otwartej komory i promiennika podczerwieni zapewniają bardziej równomierny rozkład przestrzenny temperatury manipulowanego pola.



**Ryc. 4.** Schemat działania kabla grzejnego umieszczonego pod powierzchnią gruntu (gruba linia – kabel grzejny, strzałki grube – efekt ogrzewania)

*Fig. 4. Ground warming with heat-resistance cable, where: thick line – heat-resistance cable, thick arrows – warming effect*

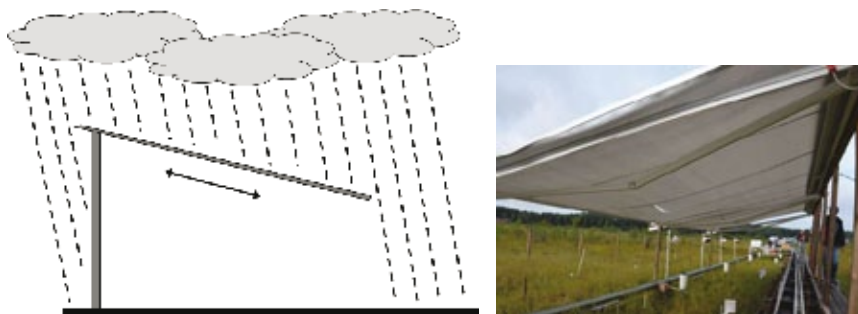
## Techniki modyfikacji warunków hydrologicznych

Modyfikacja warunków hydrologicznych jest drugim spodziewanym skutkiem zmian klimatycznych. W eksperymentach manipulacyjnych zwykle symuluje się jeden z najbardziej prawdopodobnych scenariuszy modyfikacji klimatu jakim jest susza. Podstawowe elementy bilansu wodnego to opad atmosferyczny, parowanie, odpływ oraz retencja, a modyfikacja wartości każdego z tych elementów można wykorzystać w symulacji zmian uwodnienia środowiska. Do redukcji opadu stosowane są zadaszenia zarówno ruchome, jak i stałe, które całkowicie lub częściowo zatrzymują docierającą wodę, odprowadzając ją później poza poletko doświadczalne.

## Technika markizy przeciwdeszczowej

Ilość docierającej do badanej powierzchni wody można ograniczyć poprzez zastosowanie automatycznie wysuwanej markizy, która rozwija się nad poletkiem doświadczalnym nocą – redukując opad nocny (Beier i in. 2004, Damgaard i in. 2009) lub zawsze wtedy, gdy pojawiają się opady atmosferyczne (Mikkelsen i in. 2007). W pierwszym przypadku można wyposażyć markizę w tkaninę odbłaskową osiągając w ten sposób także lokalne podwyż-

szenie temperatury. W drugim przypadku, gdy markiza jest rozwijana w czasie opadu, może być wykonana z materiału przezroczystego, aby w ciągu dnia nie ograniczać docierającego do ziemi promieniowania słonecznego. Praca takiego zadaszenia jest sterowana przy pomocy systemu, który w oparciu o informację z czujnika deszczu, wysuwa lub zamyka markizę. Dzięki materiałom nieprzepuszczającym wody (tkanina syntetyczna, plastik) i instalacji płaszczyzny pod odpowiednim kątem, można skutecznie odprowadzić wodę opadową poza powierzchnię doświadczalną. Należy zadbać, aby gromadzona woda została odprowadzona rynnami poza obszar pomiarowy i nie dostała się, np. grawitacyjnie, z powrotem na poletko doświadczalne. Zastosowanie markizy nocą pozwala na redukcję sumy opadów o około 30-40% (Juszczak i in. 2017), a w przypadku zastosowania markizy zaopatrzonej w czujnik deszczu, wielkość tej redukcji może osiągnąć nawet poziom 95% (Mikelsen i in. 2007). Zastosowanie markizy ograniczone jest do okresu, podczas którego mamy do czynienia z opadem ciekłym (deszcz, mżawka). W okresie zimowym markiza pozostaje zwinięta. Należy pamiętać o odpowiednim przygotowaniu markizy do okresu zimowego – nie wysuszona może ulec zgniciu podczas przechowywania w zwiniętej formie. Sterowanie markizą, tak jak w przypadku wersji odblaskowej, wymaga zastosowania systemu zabezpieczającego przed zbyt silnym wiatrem.

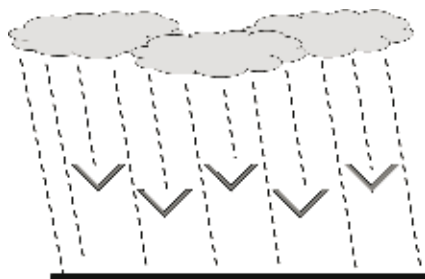


**Ryc. 5.** Schemat działania markizy przeciwdeszczowej (po lewej), markiza przeciwdeszczowa na stanowisku manipulacyjnym (po prawej) – eksperyment WETMAN, Rzecin, Polska (fot. B. H. Chojnicki)  
*Fig. 5.* Rainwater input reduction with the retractable rain curtain (left) retractable rain curtain system (right) – WETMAN experiment, Rzecin, Poland

## Technika rynienek przeciwdeszczowych

Innym sposobem na ograniczenie ilości wody opadowej jest zastosowanie stałego zadaszenia, które częściowo ogranicza jej dotarcie do poletka eksperymentalnego. Taka instalacja skonstruowana jest z przezroczystych elementów wykonanych zwykle z tworzywa sztucznego (akrylu), przezroczystego również dla promieniowania ultrafioletowego. Są to segmenty o przekroju w kształcie litery V, które instaluje się na metalowej ramie na gruncie (odległość między systemem a gruntem zależy od wysokości roślin; 0,5-2 m). Nachylenie daszka wynosi 20°. W zależności od rozstawu V-kształtnych elementów można uzyskać różny stopień redukcji opadów – od 30% (Tielbörger i in. 2014), poprzez 55% do 71% (Yahdjian i Sala 2002). Zwykle takie zadaszenie jest niewielkich rozmiarów, a ażurowa struktura konstruk-

cji dodatkowo uodparnia ją na silne porywy wiatru podczas opadów nawaalnych. Te cechy sprawiają, iż można go bezpiecznie stosować nawet w trudnych warunkach pogodowych a niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest brak systemu sterującego.



**Ryc. 6.** Schemat działania rynienek przeciwdeszczowych (po lewej), rynienki przeciwdeszczowe na stanowisku manipulacyjnym (po prawej) – eksperyment CASCADE, Góry Caramulo, Portugalia (fot. B.H. Chojnicki)

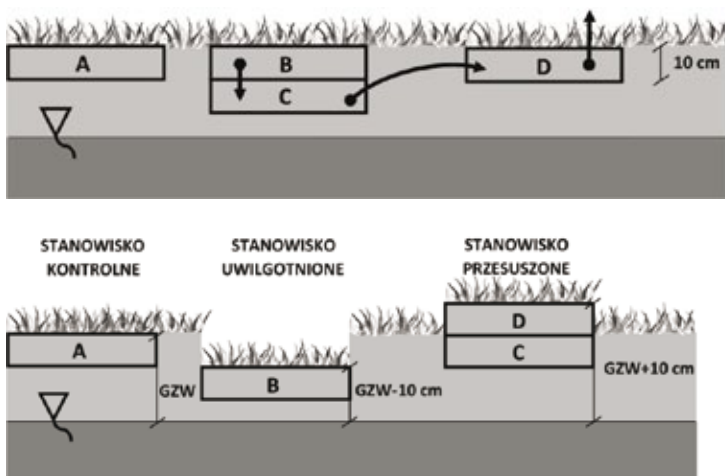
*Fig. 6. Rainwater input reduction with rainout shelter (left), rainout shelter system (right) – CASCADE experiment Caramulo Mountains, Portugal*

Inne podejście do zagadnienia zmiany reżimu hydrologicznego stanowią metody modyfikujące głębokość zwierciadła wody gruntowej, albowiem w warunkach suszy mamy do czynienia z obniżeniem zwierciadła wody gruntowej w profilu glebowym. Sztuczna modyfikacja głębokości zwierciadła wody (GZW) gruntowej może być zrealizowana poprzez odpompowanie wody z lizymetrów umieszczonych w torfie (Chimner i Cooper 2003) lub spiętrzenie wody przepływającej przez manipulowane środowisko (Ballantyne i in. 2014). W pierwszym wypadku, obniżenie osiąga się poprzez zastosowanie drenażu, a w drugim – wzrost wysokości zwierciadła wody gruntowej – uzyskuje się poprzez montaż zastawki spiętrzającej. Innym, mniej wymagającym technicznie sposobem modyfikacji GZW jest technika transplantacji torfu. Polega ona na wycięciu, a potem przeniesieniu warstwy torfu na sąsiadujące poletko o identycznym kształcie i rozmiarach. Zabieg ten wykonany jest tak, że w miejscu wycięcia torfu uzyskujemy obniżenie, a w miejscu do którego przeniesiono wycięty wcześniej substrat, wypiętrzenie wierzchniej warstwy torfowiska (Ryc. 7). W efekcie modyfikowana jest mikrotopografia torfowiska, przez co powstają dolinki (wilgotne) i kępki (suche).

## Manipulacja klimatem na torfowiskach w Polsce

Na terenie Polski zlokalizowano dwa torfowiskowe stanowiska eksperymentalne, na których zastosowano różne techniki manipulacyjne. Pierwsze z nich (zapoczątkowane w roku 2012) znajduje się na torfowisku Linje (53°11'N, 18°18'E). Jest to obiekt o powierzchni 5,95 ha, znajdujący się w gminie Dąbrowa Chełmińska w województwie kujawsko-pomorskim. Stanowisko to sklasyfikowano jako torfowisko z roślinnością typową dla torfowisk





**Ryc. 7.** Schemat manipulacji głębokością zwierciadła wody (GZW) gruntowej przy pomocy techniki transplantacji torfu. Literami oznaczono wycięte warstwy torfu (Lamentowicz, 2016)

**Fig. 7.** Water table depth (GZW) manipulation with peat transplantation method where left – control plot, center – wet plot, right – dry plot)

prześciowych, z dominacją torfowców t.j. *Sphagnum fallax* i *S. angustifolium*, rośliny naczyniowe reprezentowane są przez welniankę pochwowatą *Eriophorum vaginatum*, turzycę dziobkową *Carex rostrata* bagno zwyczajne *Ledum palustre*, borówkę bagienną, żurawinę błotną *Oxycoccus palustris* oraz unikatowy gatunek – brzozę karłowatą *Betula nana*. Dzięki temu ten obiekt został objęty ochroną w ramach sieci Natura 2000 (Hałas i in. 2008, Kloss 2005). Wokół torfowiska znajduje się las gospodarczy, który zdominowany jest przez dąb szypułkowy i sosnę zwyczajną. Na tym obszarze zastosowano manipulację temperaturą w oparciu o komory otwarte wykonane wg standardu ITEX, a zmianę głębokości zwierciadła wody gruntowej osiągnięto przy pomocy techniki transplantacji torfu.

Drugie stanowisko jest zlokalizowane na torfowisku znajdującym się we wsi Rzecin (52°45'N, 16°18'E) w gminie Wronki w województwie wielkopolskim (Chojnicki i in. 2007). Ten ekosystem zaliczany jest do torfowisk prześciowych, a ze względu na bogactwo występujących tu rzadkich i chronionych gatunków roślin oraz zwierząt, ustanowiono na nim specjalny obszar ochrony siedlisk w ramach sieci Natura 2000. W granicach torfowiska znajduje się Jezioro Rzeceńskie, łąki, szuwar trzcinowy i zarośla łozowe (Natura 2000 a, b), a sam teren podmokły zajmuje powierzchnię ok. 86 ha. Występująca na nim roślinność to m. in. rośliczka okrągłolistna *Drosera rotundifolia*, żurawina błotna *Oxycoccus palustris*, turzycza bagienna *Carex limosa* oraz wiele gatunków mchów torfotwórczych (dominacja torfowca obłego *Sphagnum teres*) (Wojterska 2001). W centralnej części obszaru ulokowano eksperyment manipulacyjny zbudowany w ramach projektu WETMAN, w którym zastosowano działające przez całą dobę promienniki podczerwieni oraz markizę przeciwdeszczową, która rozwijana jest w bezwietrzne noce (Juszczak i in. 2016, 2017).

## Dyskusja i podsumowanie

Decyzję o zastosowaniu określonej techniki manipulacyjnej należy podjąć po wcześniejszym zapoznaniu się z możliwościami oraz wymaganiami systemów manipulacyjnych, a wpływ na badane środowisko oraz wymagania opisanych technik można pogrupować wg następujących zagadnień.

## Zaburzenia powierzchni torfowiska

Podczas prac przygotowawczych trzeba wziąć po uwagę zmiany w strukturze powierzchni torfowiska, które towarzyszą zastosowaniu techniki transplantacji torfu (Lamentowicz i in. 2016) czy kabla grzejnego (Peterjohn i in. 1994). Należy także nadmienić, że oddziaływanie manipulacji spowodowanej przeniesieniem torfu zanika po 2-3 latach, w wyniku zapadania się wypiętrzonej powierzchni oraz zarastania powstałego zagłębienia. Wspomniany wcześniej montaż kabla grzejnego w podłożu wywołuje zaburzenie do tego stopnia, że zaleca się odczekanie odpowiednio długiego okresu (6-12 miesięcy) przed rozpoczęciem ogrzewania manipulowanej powierzchni (Aronson i McNulty 2009). Innym rozwiązaniem jest stworzenie poletek kontrolnych, na których bada się wpływ samego zaburzenia glebowego na ekosystem (Peterjohn i in. 1994, Lamentowicz i in. 2016).

## Koszt konstrukcji systemu manipulacyjnego

Przedstawione powyżej systemy manipulacyjne cechuje różny stopień zaawansowania technicznego, a tym samym koszty ich konstrukcji mogą być znacząco różne. Taki system jak komory otwarte wymaga stosunkowo niskich nakładów, podczas gdy zastosowanie markizy czy spiętrzenia wody wymaga już poniesienia wysokich kosztów ze strony badacza.

## System sterujący

Elementem, który sprawia, że konstrukcja instalacji manipulacyjnej jest bardziej złożona technicznie i wymaga zwykle większego nadzoru, jest system sterujący. Dzięki niemu uzyskujemy większą kontrolę nad prowadzoną manipulacją i możemy np. ustalić temperaturę ogrzewanego podłoża. Należy również pamiętać, że system kontrolujący wymaga zastosowania dodatkowego systemu zasilającego, który pozwoli na jego działanie w warunkach braku zasilania sieciowego. Jest to szczególnie ważne w przypadku stosowania markiz, których nie złożenie w warunkach silnego wiatru grozi uszkodzeniem lub całkowitym zniszczeniem instalacji. Dodatkowo, systemy sterujące wymagają podłączenia do nich czujników służących do monitorowania parametrów środowiska, takich jak anemometr (czujnik wiatru), czujnik deszczu czy czujnik poziomu wody. Taka instalacja staje się zaawansowana technicznie, a personel obsługujący system manipulacyjny musi dbać o stan techniczny nie tylko systemu, ale także kontrolować działanie zastosowanych czujników.

## Zasilanie sieciowe

Jednym z poważnych ograniczeń w zastosowaniu systemu manipulacyjnego w warunkach terenowych może być dostęp do zasilania sieciowego. Techniki takie jak: promiennika podczerwieni czy kabla grzejnego, wymagają dostarczenia olbrzymich ilości ciepła. Wiąże się to także z dużymi wydatkami na dostarczaną energię. Aspekt ekonomiczny, szczególnie w tym przypadku, musi być wzięty mocno pod uwagę w fazie planowania eksperymentu, albowiem może stać się kluczowym kryterium wyboru techniki manipulacyjnej. W przypadku zastosowania tych technik, budowa odpowiedniego systemu zasilającego, wykorzystującego odnawialne źródła energii, jest zwykle niemożliwa z uwagi na duże zapotrzebowanie systemu na energię. Innymi słowy, taka instalacja zasilająca system ogrzewający powierzchnię byłaby bardzo kosztowna. Stosowanie zasilania sieciowego wiąże się także z przestrzeganiem zasad bezpieczeństwa, które na terenach podmokłych nabierają szczególnego znaczenia.

## Wymagany nadzór

Praktycznie wszystkie systemy manipulacyjne wymagają nadzoru ze strony pracowników obsługi. Jednak ich poziom techniczny oraz częstość przeprowadzanych kontroli podykotowany jest w dużej mierze poziomem złożoności zastosowywanej instalacji. Personel musi być przeszkolony zarówno w zakresie znajomości funkcjonowania systemu, jak i wymogów bezpieczeństwa. W poniższej tabeli przedstawiono charakterystyki poszczególnych systemów manipulacyjnych.

**Tab. 1.** Charakterystyki poszczególnych systemów manipulacyjnych  
*Table 1. Characteristics of manipulation techniques*

	Zaburzenie powierzchni torfowiska	System sterujący	Zasilanie sieciowe	Koszt konstrukcji systemu	Nadzór
Komora otwarta	Nie	Nie	Nie	Niski	Sporadyczny
Markiza refleksyjna	Nie	Tak	Nie	Wysoki	Częsty
Promiennik podczerwieni	Nie	Nie	Tak	Niski	Częsty
Kabel grzejny	Tak	Tak	Tak	Niski	Sporadyczny
Markiza przeciwdeszczowa	Nie	Tak	Nie	Wysoki	Częsty
Rynienki przeciwdeszczowe	Nie	Nie	Nie	Niski	Sporadyczny
Transplantacja torfu	Tak	Nie	Nie	Niski	Sporadyczny
Pompowanie	Tak	Tak	Tak	Wysoki	Częsty
Spiętrzanie	Nie	Nie	Nie	Wysoki	Sporadyczny

Opisane powyżej metody manipulacyjne mogą posłużyć do badań na temat przyszłości funkcjonowania torfowisk w nowych warunkach klimatycznych. Powyższa publikacja pozwala na wybór odpowiednich metod po ówczesnym przeanalizowaniu uwarunkowań lokalnych, potencjału technicznego, zdolności ekonomicznych oraz zasobów ludzkich.

## Podziękowania

Niniejszy tekst inspirowany był badaniami prowadzonymi w ramach Szwajcarsko-Polskiego Programu Współpracy, czyli tzw. Funduszu Szwajcarskiego dla krajów powiększonej Unii Europejskiej (Projekt PSPB-013/2010), Polsko Norweskiego Programu Współpracy (Narodowy Fundusz Badań i Rozwoju: Projekt WETMAN Central European Wetland Ecosystem Feedbacks to Changing Climate – Field Scale Manipulation), oraz w ramach projektów finansowanych z Narodowego Centrum Nauki (N N306 060940, 2015/17/B/ST10/01656, 2015/17/B/ST10/03430, 2015/19/N/NZ8/00172 oraz 2016/21/B/ST10/02271). Dziękujemy także dr. Bjoernowi Robroek i dr. Hannie Silvennoinen za pomoc i cenne wskazówki podczas tworzenia tej pracy.

## Literatura

- Aronson E.L., McNulty S.G. 2009. Appropriate experimental ecosystem warming methods by ecosystem, objective, and practicality. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (2009): 1791-1799.
- Ballantyne D.M., Hribljan J.A., Pypker T.G., Chimner R.A. 2014 Long-term water table manipulations alter peatland gaseous carbon fluxes in Northern Michigan Wetlands *Ecol Manage* 22:35-47
- Beier C., Emmett B., Gundersen P., Tietema A., Peñuelas J., Estiarte M., Gordon C., Gorissen A., Llorens L., Roda F., Williams D. 2004. Novel Approaches to Study Climate Change Effects on Terrestrial Ecosystems in the Field: Drought and Passive Nighttime Warming. *Ecosystems*, 7: 583.
- Bergh J., Linder S. 1999. Effects of soil warming during spring on photosynthetic recovery in boreal Norway spruce stands. *Global Change Biology*, 5 (3): 245-253.
- Buttler, A., Robroek, B.J.M., Laggoun-Defarge, F., Jassey, V.E.J., Pochelon, C., Bernard, G., Delarue, F., Gogo, S., Mariotte, P., Mitchell, E.A.D., Bragazza, L., 2015. Experimental warming interacts with soil moisture to discriminate plant responses in an ombrotrophic peatland. *Journal of Vegetation Science* 26, 964-974.
- Chimner R.A., Cooper D.J. 2003. Influence of water table levels on CO<sub>2</sub> emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study. *Soil Biology & Biochemistry* 35, 345-351
- Chojnicki B.H., Urbaniak M., Józefczyk D., Augustin J., Olejnik J. 2007. Measurement of gas and heat fluxes at Rzecin wetland. *Wetlands*, Londyn
- Clymo R.S., Turunen J., Tolonen K. 1998. Carbon Accumulation in Peatland. *Oikos*, 81(2):368-388.
- Crowther T.W., Todd-Brown K. E. O., Rowe C. W., Wieder W. R., Carey J. C., Machmuller M. B., Snoek B. L., Fang S., Zhou G., Allison S. D., Blair J. M., Bridgham S. D., Burton A. J., Carrillo Y., Reich P. B., Clark J. S., Classen A. T., Dijkstra F. A., Elberling B., Emmett B. A., Estiarte M., Frey S. D., Guo J., Harte J., Jiang L., Johnson B. R., Kröel-Dulay G., Larsen K. S., Laudon H., Lavalley J. M., Luo Y., Lupascu M., Ma L. N., Marhan S., Michelsen A., Mohan J., Niu S., Pendall E., Peñuelas J., Pfeifer-Meister L., Poll C., Reinsch S., Reynolds L. L., Schmidt I. K., Sistla S., Sokol N. W., Templer P. H., Treseder K.

- K., Welker J. M., Bradford M. A. 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 540: 104-108.
- Damgaard C., Riis-Nielsen T., Schmidt I.K. 2009. Estimating Plant Competition Coefficients and Predicting Community Dynamics from Non-Destructive Pin-Point Data: A Case Study with *Calluna Vulgaris* and *Deschampsia Flexuosa*. *Plant Ecology, Herbaceous Plant Ecology*, 201(2): 687-697.
- de Jong, R., Blaauw, M., Chambers, F.M., Christensen, T.R., De Vleeschouwer, F., Finsinger, W., Fronzek, S., Johansson, M., Kokfelt, U., Lamentowicz, M., LeRoux, G., Mitchell, E.A.D., Mauquoy, D., Nichols, J.E., Samaritani, E., van Geel, B., 2010. Climate and Peatlands, in: Dodson, J. (Ed.), *Changing Climates, Earth Systems and Society. Series: International Year of Planet Earth*. Springer, Heidelberg, pp. 85-121.
- Emmett B.A., Beier C., Estiarte M., Tietema A., Kristensen H.L., Williams D., Penuelas J., Schmidt I., Sowerby A. 2004. The response of soil processes to climate change: results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems*, 7 (6): 625-637.
- Fitter A.H., Self G.K., Brown T.K., Bogie D.S., Graves J.D., Benham D., Ineson P. 1999. Root production and turnover in an upland grassland subjected to artificial soil warming respond to radiation flux and nutrients, not temperature. *Oecologia*, 120 (4): 575-581.
- Gorham E. 1991. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probably responses to climate warming. *Ecological Applications*, 1 (2): 182-195.
- Grime J.P., Brown V.K., Thompson K., Masters G.M., Hillier S.H., Clarke I.P., Askew A.P., Corker D., Kieley J.P. 2000. The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. *Science*, 289 (5480): 762-765.
- Hałas S., Słowiński M., Lamentowicz M. 2008. Relacje między czynnikami meteorologicznymi i hydrologią małego torfowiska mszarnego na Pomorzu. *Studia Limnologica et Telmatologica*, 2 (1): 15-26.
- Harte J., Torn M.S., Chang F.-R., Feifarek B., Kinzig A.P., Shaw R., Shen K. 1995. Global warming and soil microclimate – results from a meadow-warming experiment. *Ecological Applications*, 5 (1): 132-150.
- Hooijer A., Page S., Canadell J. G., Silvius M., Kwadijk J., Wosten H., Jauhiainen J. 2010. Current and future CO<sub>2</sub> emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences*, 7: 1505-1514.
- IPCC 2014: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf).
- Juszcak R., Kuchar L., Leśny J., Olejnik J. 2013. Climate change impact on development rates of the Codling Moth (*Cydia pomonella* L.) in the Wielkopolska region, Poland. *International Journal of Biometeorology*, 57 (1): 31-44.
- Juszcak R., Chojnicki B., Urbaniak M., Leśny J., Silvennoinen H., Lamentowicz M., Basińska A., Gąbka M., Stróżecki M., Samson M., Łuców D., Józefczyk D., Hoffmann M., Olejnik J. 2016 Short term response of a peatland to warming and drought – climate manipulation experiment in W Poland. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-14558-2.
- Juszcak R., Basińska A. M., Chojnicki B.H., Gąbka M., Hoffmann M., Józefczyk D., Lamentowicz M., Leśny J., Łuców D., Moni Ch., Reczuga M., Samson M., Silvennoinen H., Stróżecki M., Urbaniak M., Zielińska M., Olejnik J. 2017. Towards a better understanding of Sphagnum peatland ecosystem response to active warming and precipitation reduction in CE Europe. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 19, EGU2017-18838-1.

- Kimball B.A., Conley M.M., Lewin K.F. 2012 Performance and energy costs associated with scaling infrared heater arrays for warming field plots from 1 to 100 m. *Theor Appl Climatol*, 108 (1-2): 247-65.
- Kimball B.A., Conley M.M., Wang S., Lin X., Luo C., Morgan J., Smith D. 2008 Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology*, 14 (2): 309-20.
- Kloss M. 2005. Palaeobotanical studies of raised mires. *Mono-graphiae Botanicae*, 94: 7-18.
- Llusia J., Penuelas J., Alessio G.A., Estiarte M. 2006. Seasonal contrasting changes of foliar concentrations of terpenes and other volatile organic compound in four dominant species of a Mediterranean shrubland submitted to a field experimental drought and warming. *Physiologia Plantarum*, 127 (4): 632-649.
- Lamentowicz M., Słowińska S., Słowiński M., Jassey V.E.J., Chojnicki B.H., Reczuga M.K., Zielińska M., Marcisz K., Lamentowicz Ł., Barabach J., Samson M., Kołaczek P., Buttler A., 2016 Combining short-term manipulative experiments with long-term paleoecological investigations at high resolution to assess the response of Sphagnum peatlands to drought, fire and Warming. *Mires and Peat* 18, 20: 1-7.
- Luxmoore R.J., Hanson P.J., Beauchamp J.J., Joslin J.D. 1998. Passive nighttime warming facility for forest ecosystem research. *Tree Physiology*, 18 (8-9): 615-623.
- Marion G., Henry G., Freckman D., Johnstone J., Jones G., Jones M.H., Levesque E., Molau U., Mølgaard P., Parsons A.N., Virginia R.A. 1997. Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems. *Global Change Biology*, 3: 20-32.
- Mikkelsen T.N., Beier C., Jonasson S., Holmstrup M., Schmidt I.K., Ambus P., Pilegaard K., Michelsen A., Albert K., Andresen L.C., Arndal M.F., Bruun N., Christensen S., Danbæk S., Gundersen P., Jørgensen P., Linden L. G., Kongstad J., Maraldo K., Priemé A., Riis-Nielsen T., Ro-Poulsen H., Stevnbak K., Selsted M.B., Sørensen P., Larsen K.S., Carter M.S., Ibrom A.,
- Martinussen T., Miglietta F., Sverdrup H. 2008. Experimental design of multifactor climate change experiments with elevated CO<sub>2</sub>, warming and drought: the CLIMAITE project. *Functional ecology*, 22: 185-195.
- Natura 2000a. <http://obszary.natura2000.org.pl/index.php?s=obszar&id=427>.
- Natura 2000b. <http://obszary.natura2000.org.pl/index.php?s=obszar&id=381>.
- Norby R.J., Edwards N.T., Riggs J.S., Abner C.H., Wullschlegel S.D., Gunderson C.A. 1997. Temperature-controlled open-top chambers for global change research. *Global Change Biology*, 3 (3): 259-267.
- Peterjohn W.T., Melillo J.M., Steudler P.A., Newkirk K.M., Bowles F.P., Aber J.D. 1994. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecological Applications*, 4 (3): 617-625.
- Shaver G.R., Canadell J., Chapin F.S., Gurevitch J., Harte J., Henry G., Ineson P., Jonasson S., Melillo J., Louis Pielka L., Rustad L. 2000. Global warming and terrestrial ecosystems: A conceptual framework for analysis. *Bioscience*, 50(10): 871-882. doi:10.1641/0006-3568(2000)050[0871:gwatera]2.0.co;2
- Tielbörger K., Bilton M.C., Metz J., Kigel J., Holzapfel C., Lebrija-Trejos E., Konsens I., Parag H.A., Sternberg M. 2014. Middle Eastern plant communities tolerate 9 years of drought in a multisite climate manipulation experiment. *Nature Communications* 5, Article number: 5102.

- Tobolski, K., 2003. Torfowiska, na przykładzie Ziemi Świeckiej. Towarzystwo Przyjaciół Dolnej Wisły, Świecie.
- Turunen J., Tomppo E., Tolonen K., Reinikainen A. 2002. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *The Holocene*, 12 (1): 69-80.
- Waddington J. M., J. S. Price. 2000. Effect of peatland drainage, harvesting, and restoration on atmospheric water and carbon exchange. *Phys. Geog.*, 21: 433-451.
- Wojterska M. 2001. Szata roślinna Wielkopolski i Pojezierza Południowopolskiego. *Wyd. nauk. Bogucki, Poznań*
- Yahdjian L., Sala O.E. 2002. *Oecologia*, 133: 95.

**<sup>1</sup>Bogdan H. Chojnicki, <sup>1</sup>Kamila M. Harenda, <sup>1</sup>Mateusz Samson, <sup>2</sup>Sandra Słowińska, <sup>3</sup>Michał Słowiński, <sup>1,4</sup>Mariusz Lamentowicz, <sup>4</sup>Jan Barabach, <sup>4</sup>Małgorzata Zielińska, <sup>5</sup>Vincent E.J. Jassey, <sup>6</sup>Alexander Buttler, <sup>1</sup>Marcin Stróżecki, Jacek Leśny, Marek Urbaniak, Damian Józefczyk, Radosław Juszczyk**

<sup>1</sup>Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Meteorologii;  
<sup>2</sup>Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Zakład Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Falenty;  
<sup>3</sup>Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Zakład Zasobów Środowiska i Geozagrożeń; <sup>4</sup>Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Pracownia Ekologii i Monitoringu Mokradel; <sup>5</sup>Swiss Federal Research Institute-WSL, Community Ecology Research Unit, Lausanne, Szwajcaria ; <sup>6</sup>École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratory of Ecological Systems, Szwajcaria

bogdan.chojnicki@gmail.com,  
kamilaharenda@gmail.com, samson.mateusz@gmail.com, s.slowinska@itp.edu.pl,  
michal.slowinski@geopan.torun.pl, mariuszl@amu.edu.pl, jan.barabach@gmail.com,  
mneumann@amu.edu.pl, bjorn.robroek@epfl.ch, vincent.jassey@epfl.ch,  
alexandre.buttler@epfl.ch, jlesny@up.poznan.pl, murbaniak76@gmail.com, dam.  
jozefczyk@gmail.com, marcin.strozecki@gmail.com, janusz.olejnik@up.poznan.pl,  
radjusz@up.poznan.pl