

Strategie ochrony makrofitów przed inwazją *Tetranychus urticae* i infekcjami grzybowymi w systemach hydroponicznych – studium przypadku

Strategies for the protection of macrophytes from *Tetranychus urticae* invasion and fungal infections in hydroponic systems – a case study

MAGDALENA NOWAK

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.10.07

Artykuł analizuje zagrożenia biotyczne w laboratoryjnych systemach hydroponicznych na przykładzie kaskadowej inwazji przędziorka chmielowca (*Tetranychus urticae*) oraz wtórnej kolonizacji grzybami. Pierwotny cel badań, dotyczący oceny zdolności wybranych gatunków makrofitów: *Juncus effusus*, *Alisma plantago-aquatica*, *Pontederia cordata* oraz *Typha angustifolia*, do regulacji biogenów w medium płynnym, został zweryfikowany wskutek inwazji *T. urticae*. Nowe założenia ukierunkowano na przywrócenie potencjału fitoremediacyjnego makrofitów oraz na ocenę podjętych działań ratunkowych. Metodyka obejmowała mechaniczne usuwanie szkodników, interwencyjne opryski preparatami Agrocover i Agricolle oraz przeniesienie ocalałych roślin do podłoża glebowego uprzednio naświetlanego promieniowaniem UV. Zastosowanie promieniowania UV w laboratorium zbiegło się w czasie z nasileniem objawów grzybowych; obserwacja ta uzasadnia jedynie hipotezę o możliwym znaczeniu zmian w równowadze mikrobiologicznej. W fazie infekcji grzybowej końcowa przeżywalność wyniosła 13% (3 z 23 roślin), a śmiertelność 87%. W pierwszej fazie ataku przędziorka największym zasiedleniem odznaczała się *Pontederia cordata*, natomiast największą przeżywalnością w tej fazie wykazał się *Juncus effusus*. *Juncus effusus* nie przetrwał natomiast późniejszej fazy infekcji grzybowej. Wyniki wskazują, że kontrola mikroklimatu oraz monitoring kondycji roślin są istotne dla zachowania stabilności procesów fitoremediacyjnych. Uzyskane obserwacje pozwalają na wstępną ocenę zachowania wybranych makrofitów w warunkach skumulowanego stresu biotycznego i termicznego.

Słowa kluczowe: *Tetranychus urticae*, kolonizacja grzybowa, systemy hydroponiczne, makrofity wodne, fitoremediacja

This article analyses biotic threats in laboratory hydroponic systems using the example of a cascading infestation by the two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*) and subsequent fungal colonisation. The original aim of the study was to assess the ability of selected macrophyte species – *Juncus effusus*, *Alisma plantago-aquatica*, *Pontederia cordata* and *Typha angustifolia* – to regulate nutrients in a liquid medium. This aim was revised following the *T. urticae* infestation. The revised objective was to restore the phytoremediation potential of the macrophytes and to assess the rescue measures undertaken. The procedure included mechanical removal of pests, emergency spraying with Agrocover and Agricolle preparations, and transfer of surviving plants to soil substrate previously exposed to UV radiation. The use of UV radiation in the laboratory coincided with an intensification of fungal symptoms; this temporal association supports only a hypothesis that changes in microbial balance may have contributed to fungal development. During the fungal-infection phase, final survival was 13% (3 of 23 plants), corresponding to 87% mortality. During the initial phase of the spider mite attack, *Pontederia cordata* showed the highest infestation, whereas *Juncus effusus* had the highest survival rate. *Juncus effusus* did not survive the subsequent fungal-infection phase. The observations indicate that microclimate control and monitoring of plant condition are important for maintaining the stability of phytoremediation processes. The results provide a preliminary assessment of the response of selected macrophytes to combined biotic and thermal stress.

Keywords: *Tetranychus urticae*, fungal colonisation, hydroponic systems, aquatic macrophytes, phytoremediation

Wprowadzenie

Współczesna inżynieria ekologiczna stoi przed bezprecedensowym wyzwaniem, jakim jest konieczność opracowania wysokowydajnych i zrównoważonych

metod rewitalizacji zasobów wodnych. W dobie postępującej antropopresji oraz globalnych zmian klimatycznych tradycyjne metody oczyszczania wód płynących często okazują się niewystarczające lub ekonomicznie nieuzasadnione, co wymu-

sza poszukiwanie alternatywnych dróg biotechnologicznych (Hara i in., 2018). W tym kontekście nadrzędnym celem stworzenia i testowania pracy układu hydroponicznego była intensyfikacja naturalnych procesów samooczyszczania poprzez

mgr inż. Magdalena Nowak, Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, ul. J.H. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, Poland, e-mail: nowak.magdalena@pcz.pl

Data zgłoszenia: 1.06.2026. Data przyjęcia: 5.10.2026. Data publikacji: 20.10.2026

wykorzystanie wyselekcjonowanych gatunków roślin wodnych (makrofity) oraz innowacyjnych biopreparatów, których zadaniem jest aktywna regulacja stężeń substancji biogennych, w szczególności związków azotu i fosforu w środowisku wodnym. Projektowanie takich systemów jako dynamicznych biofiltrów wymaga dogłębnego zrozumienia biologicznych podstaw tolerancji roślin na stresy abiotyczne i biotyczne, które w warunkach laboratoryjnych nabierają specyficznego, często gwałtownego charakteru (Weidner, 2015). W trakcie realizacji eksperymentu ekstremalne warunki termiczne zainicjowały kaskadowe zmiany w strukturze biotycznej biofiltra. Zjawisko to wymusiło reorientację zakresu oraz celu badawczego na analizę mechanizmów destabilizacji ekosystemu hydroponicznego oraz ocenę skuteczności procedur naprawczych.

Implementacja systemów hydroponicznych w badaniach nad regulacją biogenów pozwala na kontrolę parametrów fizykochemicznych medium, jednocześnie tworząc specyficzny mikroklimat – środowisko o wysokiej wilgotności i stabilnej temperaturze, które sprzyja nie tylko wzrostowi roślin, ale i rozwojowi agrofagów. Stabilność takich zamkniętych ekosystemów jest determinowana przez kruchą homeostazę między biopreparatem wspomagającym a kondycją fizjologiczną makrofity. Jak wskazują liczne analizy, każda destabilizacja tego układu prowadzi do drastycznego spadku wydajności procesów metabolicznych, co bezpośrednio przekłada się na błędy w pomiarach hydrochemicznych i fałszuje bilans masowy substancji biogennych. Właściwa diagnostyka objawów chorobowych oraz wczesna identyfikacja szkodników stają się zatem nie tylko elementem ochrony roślin, ale fundamentem metodologicznym, warunkującym rzetelność naukową eksperymentów. Jest to szczególnie istotne, gdyż współczesne uproszczenia w agrotechnice oraz zmiany środowiskowe sprzyjają masowemu występowaniu patogenów, co zmusza badaczy do wdrażania rygorystycznych zasad bioasekuracji (Osowski, 2020; Osowski, 2021; Mazurek i Nowik, 2018).

W układach hydroponicznych roślin są eksponowane na stres o dychotomicznym charakterze. Z jednej strony dysponują optymalnym dostępem do substancji odżywczych, co stymuluje ich przyrost, z drugiej zaś – brak naturalnej bariery glebowej oraz izolacja od naturalnych wrogów szkodników czynią je skrajnie podatnymi na ataki polifagicznych agresorów, takich jak przędziorek chmielowiec (*Tetranychus urticae*) (Godzina-Sawczuk, 2013; Ulatowska i in., 2015). Żerowanie tych roztoczy indukuje szereg negatywnych

odpowiedzi fizjologicznych, w tym stres oksydacyjny oraz spadek intensywności fotosyntezy, co w połączeniu z oportunistycznymi infekcjami grzybowymi wywołanymi przez grzyby z rodzaju *Botrytis* może prowadzić do nieodwracalnej degradacji biomasy (Tomczyk i in., 2012; Kempka, 2014). Niniejszy artykuł podejmuje próbę analizy tych kaskadowych zagrożeń biotycznych w formie studium przypadku laboratoryjnego układu hydroponicznego oraz oceny skuteczności zastosowanych działań ratunkowych. Wskazuje to na konieczność integracji wiedzy z zakresu biotechnologii, entomologii oraz inżynierii środowiska w celu ochrony integralności procesów fitoremediacyjnych w ekosystemach wodnych.

Dynamika inwazji *Tetranychus urticae* w ekosystemach wodnych i przybrzeżnych

W laboratoryjnych systemach hydroponicznych jednym z najbardziej krytycznych zagrożeń biotycznych jest pojawienie się przędziorka chmielowca (*Tetranychus urticae*). Ten polifagiczny pajączak (rys. 1-2), należący do rzędu roztoczy, wykazuje niezwykłą zdolność do gwałtownej kolonizacji roślin w warunkach podwyższonej temperatury, która często towarzyszy procesom badawczym związanym z florą oraz jej zdolnością do absorbowania substancji biogennych, tj. $N-NO_3$, $N-NH_4^+$ czy $P-PO_4$, ze środowiska zarówno glebowego, jak i wodnego. Status *T. urticae* jako kluczowego agrofaga wynika z jego ogromnego potencjału rozrodczego oraz plastyczności w adaptacji do zróżnicowanych gatunków roślin żywicielskich (Godzina-Sawczuk, 2013; Ulatowska i in., 2015).

W sprzyjającym mikroklimacie – charakteryzującym się wysoką temperaturą i lokalnie niską wilgotnością przy blaszce liściowej – cykl rozwojowy tego szkodnika ulega drastycznemu skróceniu, co w skrajnych przypadkach prowadzi do geometrycznego przyrostu populacji w czasie krótszym niż tydzień. Dorosłe osobniki w okresie letnim charakteryzują się przezroczystą budową ciała (rys. 1), przez którą prześwituje zielona treść pokarmowa. W okresie jesiennym zmiany fotoperiodu oraz znaczne obniżenie temperatury wywołują zmiany procesów hormonalnych i metabolicznych. Skutkuje to intensyfikacją syntezy karotenoidów, co bezpośrednio przekłada się na zmianę ich ubarwienia na kolor czerwony (rys. 2). Zimą, gdy osobniki wchodzi w stan diapauzy, barwa ta pozwala im skutecznie ukryć się pod opadłymi liśćmi lub w szczelinach kory oraz zwiększa odporność na chłód i niekorzystne warunki podczas zimowania. Gatunek rośliny żywicielskiej determinuje subtelne różnice w ubarwieniu *T. urticae*.



Rys. 1. Młoda samica *T. urticae*

Fig. 1. Young female of *Tetranychus urticae*
Źródło: <https://www.flickr.com/photos/sanmartin/49637496276>



Rys. 2. Samica *T. urticae* w czerwonej formie

Fig. 2. Female of *Tetranychus urticae* in the red form
Źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tetranychus_urticae_%284883560779%29.jpg

Szkodliwość *T. urticae* jest nierozzerwalnie związana z unikalnym mechanizmem pobierania pokarmu, który bezpośrednio narusza integralność aparatu asymilacyjnego rośliny. Poprzez nakłuwanie epidermy i wysysanie zawartości komórek mięszku, pajączak doprowadza do degradacji chloroplastów. Wizualnym efektem tego procesu są początkowo drobne, jasne plamki, które wraz z postępem inwazji zlewają się w rozległe nekrozy, prowadząc do brązowienia i przedwczesnego zamierania liści (Osowski, 2020; Tomczyk i Andryka, 2016). Z perspektywy inżynierii środowiska najważniejszym skutkiem żerowania jest jednak indukowany stres oksydacyjny oraz drastyczny spadek intensywności fotosyntezy. Uszkodzenie tkanek mięszkowych upośledza aktywny transport biogenów, co sprawia, że wyniki badań nad regulacją azotu czy fosforu z udziałem roślin w środowisku wodnym oraz glebowym stają się niewiarygodne. Dodatkowym czynnikiem komplikującym jest produkcja gęstej pajęczyny, która nie tylko chroni kolonię, ale również tworzy barierę hydrofobową, ograniczającą skuteczność biopreparatów i utrudniającą wymianę gazową rośliny. Wczesna diagnostyka i identyfikacja pierwszych ognisk zapalnych są zatem kluczowe, gdyż nieodwracalne zmiany metaboliczne zachodzą znacznie szybciej, niż wskazują na to objawy morfologiczne widoczne gołym okiem (Osowski, 2021; Tomczyk i in., 2012).

Kolonizacja grzybowa w warunkach trwałej ekspozycji na medium wodne

Załamaniu kondycji roślin wywołane-
mu przez roztocza może towarzyszyć
wtórna kolonizacja grzybowa. W syste-
mach hydroponicznych, gdzie znacząca
część biomasy – w tym cały system korze-
niowy oraz nasada łodygi – znajduje się
w bezpośrednim i trwałym kontakcie
z wodą, warunki mogą sprzyjać rozwojowi
grzybów na osłabionych tkankach. Jednym
z istotnych fitopatogenów roślin jest
Botrytis cinerea, sprawca szarej pleśni, któ-
rego rozwój może się nasilać przy wysokiej
wilgotności (Hara i in., 2018; Kempka,
2014). Rzęsa wodna była wykorzystywana
jako model do badań interakcji roślina-
mikroorganizm, m.in. w badaniach koloni-
zacji przez bakterie patogenne (Zhang
i in., 2010). W niniejszym badaniu nie
przeprowadzono identyfikacji gatunkowej
obserwowanych struktur grzybowych, dla-
tego dalsze odniesienia dotyczą objawów
i kolonizacji grzybowej, a nie potwierdzo-
nego gatunku patogenu.

Kluczowym problemem badawczym
jest fakt, że trwała ekspozycja roślin na
duże ilości wody drastycznie obniża ich
naturalną barierę odpornościową w strefie
styku fazy wodnej i powietrznej. Patogeny
grzybowe wykorzystują mikrourazy mecha-
niczne powstałe w wyniku żerowania
T. urticae jako bezpośrednie punkty inoku-
lacji, co umożliwia rozwój infekcji systemo-
wej. Grzybnia penetruje tkanki miękkie,
prowadząc do ich upłynięcia, co w warunkach
nasycenia wodą manifestuje się jako gwałtowne
gnicie podstawy pędu oraz degradacja systemu
korzeniowego (Osowski, 2021). Proces ten jest
szczególnie destrukcyjny, ponieważ w zamknię-
tym obiegu wody zarodniki są transportowane
błyskawicznie między wszystkimi jednost-
kami uprawnymi, prowadząc do epidemii
w całym układzie doświadczalnym. Z punktu
widzenia inżynierii ekologicznej gnicie biomasy
indukuje wtórny wyrzut substancji organicz-
nych i biogenów do wody, co całkowicie niweczy
cel badawczy oczyszczania wody płynącej. W zwi-
ązk z powyższym kluczowym zagadnieniem
staje się dobór optymalnej strategii ochron-
nej, która pozwoli na zachowanie ciągłości
procesów fitoremediacyjnych bez wprowadza-
nia dodatkowych zmiennych do układu. Klasyczne
ujęcia biologicznej ochrony roślin podkreślają
znaczenie antagonistycznych mikroorganizmów
i warunków sprzyjających biologicznej supresji
patogenów (Cook i Baker, 1983). Choć literatura
wskazuje na wysoki potencjał ekologicznych
metod ochrony opartych na biopreparatach
oraz naturalnych substancjach inhibujących,
takich jak wyciągi z mięty pieprzowej (Grzegorz-
czyk i in., 2015; Hara

i in., 2018), ich skuteczność jest często
ograniczona do działań profilaktycznych
lub wczesnych stadiów infekcji. W sytu-
acjach krytycznych, charakteryzujących się
gwałtownym tempem namnażania pato-
geny w systemie hydroponicznym, metody
naturalne mogą okazać się niewystarczające
do opanowania ogniska choroby. W takich
przypadkach niezbędna staje się ewaluacja
metod interwencyjnych, w tym zastosowanie
celowanych preparatów chemicznych o działaniu
kontaktowym lub układowym. Decyzja o wdro-
żeniu oprysku chemicznego, mimo jego po-
tencjalnej fitotoksyczności, bywa podyktowana
koniecznością natychmiastowej sanacji śro-
dowiska i ochrony pozostałej biomasy przed
całkowitą degradacją, co stanowi fundamen-
t dla zachowania integralności całego systemu
badawczego.

Cel badań

Zasadniczym celem podjętych badań
laboratoryjnych była ocena zdolności
wybranych gatunków makrofitytów do aktywniej
regulacji stężeń substancji biogenych w
środowisku wodnym. Przeprowadzone analizy
stanowiły kluczowy element prac nad procesami
fitoremediacyjnymi w wodach płynących.

W toku realizacji prac pierwotny cel
badawczy musiał zostać czasowo zawieszony.
Decyzja ta była podyktowana gwałtowną
inwazją *T. urticae* oraz towarzyszącą jej
anomalią termiczną, co doprowadziło do
pogorszenia kondycji materiału roślinnego.
W zaistniałych okolicznościach priorytetem i
nowym celem stało się wdrożenie wieloetapo-
wego protokołu ratunkowego, ukierunkowa-
nego na sanację środowiska wzrostu oraz od-
zyskanie zdolności asymilacyjnych bada-
nych makrofitytów, co warunkowało moż-
liwość kontynuowania pierwotnego nurtu
badawczego.

Materiały i metodyka badań

Eksperyment prowadzono w warun-
kach laboratoryjnych z wykorzystaniem
systemów hydroponicznych. W okresie
letnim stabilność układu doświadczalnego
została zakłócona gwałtowną inwazją
T. urticae, której towarzyszyła silna ano-
malia termiczna. Temperatura powietrza
w laboratorium wynosiła w ciągu dnia od
30°C do 39°C i utrzymywała się na tym
poziomie przez większość czasu trwania
inwazji. Wilgotności względnej powietrza
nie mierzono aparaturowo; odnotowano
jedynie subiektywnie odczuwalną stagna-
cję wilgotnego powietrza.

Stanowisko badawcze składało się
z dwóch zestawów hydroponicznych,
z których każdy był wyposażony w zbiornik
główny o objętości roboczej około 50 l,
wypełniony wodą wodociągową wzboga-
coną nawozem T.A. Terra Aquatica TriPart
N-P-K 3-1-6, oraz dwie równoległe rynny
uprawne zasilane ze wspólnego zbiornika.
W każdej rynnie znajdowało się po pięć
gniazd, co pozwalało na jednoczesną
hodowlę dziesięciu osobników w jednym
module. Medium było tłoczone ze zbiornika
głównego do rynien za pomocą pompy
wodnej. Każda rynna miała osobny
odpływ zwrotny, a medium z obu rynien
mieszało się po powrocie do wspólnego
zbiornika.

Rośliny umieszczono w koszykach
o średnicy i głębokości około 10 cm.
W trakcie zwalczania inwazji poziom
lustra wody w dwóch aktywnych wówczas
stanowiskach wynosił 1-1,5 cm od dna
koszyka. Po inwazji i uruchomieniu
dwóch dodatkowych modułów wysokość
medium w nowych jednostkach ustalono na
około 2 cm. Taka konfiguracja zapewniała
całkowite zanurzenie systemu korzeniowe-
go oraz – w przypadku mniejszych sadzo-
nek – niewielkiego fragmentu łodygi
w medium wodnym.



Fig. 3. Roślinna obsada gatunkowa na stanowisku badawczym
Fig. 3. Plant species composition in the experimental setup

Obsadę roślinną na każdym z dwóch stanowisk stanowiły pierwotnie: 2 sity rozpierzchłe (*Juncus effusus*), 2 żabieńce (*Alisma plantago-aquatica*), 2 rozplawy sercolistne (*Pontederia cordata*) oraz 2 palki wąskolistne (*Typha angustifolia*), co łącznie dawało populację 16 sadzonek (rys. 3). Po opanowaniu zagrożenia ze strony przędziorka i wdrożeniu regeneracji, strukturę obsady zmodyfikowano, uwzględniając rośliny, które przetrwały inwazję oraz nowo nabyte osobniki. W fazie tej systemy zasiedlało: 12 sadzonek situ rozpierzchłego pozyskanych z podziału roślin ocalałych), 2 żabieńce (ocalałe), 6 pałek wąskolistnych (w tym 2 ocalałe i 4 nowo nabyte) oraz 3 rozplawy sercolistne (w tym 1 ocalały i 2 nowe).

Metodykę działań ratunkowych podzielono na etapy odpowiadające chronologii pojawiania się zagrożeń biotycznych. W odpowiedzi na inwazję *T. urticae* opracowano sekwencyjny protokół ograniczania liczebności szkodnika. Pierwsza faza obejmowała wyłącznie zabiegi mechaniczne, a w kolejnej zastosowano preparat o działaniu fizyczno-kontaktowym. Ostatecznie połączono pielęgnację mechaniczną z zabiegami opryskowymi. Próby mechanicznego usuwania *T. urticae* prowadzono dwa razy w tygodniu przez 21 dni. Ze względu na nawroty inwazji zdecydowano o użyciu preparatu Agrocover Spray (rys. 4), tworzącego na powierzchni szkodników powłokę ograniczającą ich funkcje życiowe. Preparat наносzono dolistnie metodą oprysku drobnokroplistego do granicy spływu cieczy z powierzchni blaszek liściowych i łodyg. Faza opryskowa trwała 3 tygodnie; częstotliwość aplikacji zwiększono z zalecanego przez producenta cyklu 7-dniowego do cyklu 4-dniowego. Po zakończeniu aplikacji prowadzono 2-tygodniową obserwację. Następnie przez 30 dni stosowano procedurę łączącą czyszczenie mechaniczne i oprysk. Przez pierwsze 12 dni zabieg wykonywano co 4 dni. Każdy zabieg rozpoczynano od dokładnego mechanicznego oczyszczenia części nadziemnych i podziemnych roślin wodą. Ręczne przemywanie i delikatne przecieranie miękką gąbką miało na celu usunięcie stadiów rozwojowych szkodnika oraz pozostałości filmu po preparacie. Po odparowaniu nadmiaru wody na powierzchnię liści aplikowano Agrocover Spray. W drugiej części tej fazy wstrzymano zabiegi pielęgnacyjne i opryskowe, monitorując ewentualny nawrót populacji.

Drugim zagrożeniem biotycznym w układzie doświadczalnym była wtórna kolonizacja grzybowa obserwowana po ograniczeniu inwazji *T. urticae*.



Rys. 4. Preparat Agrocover Spray wykorzystany w badaniach do fizycznego ograniczania liczebności *T. urticae*
Fig. 4. Agrocover Spray used in the study for the physical reduction of *Tetranychus urticae* abundance

Objawy pojawiły się najpierw i z większą intensywnością na osłabionych osobnikach, które przetrwały wcześniejsze żerowanie roztocza, a następnie także na nowo wprowadzonych roślinach. Protokół ratunkowy rozszerzono o usuwanie widocznych kolonii oraz aplikację preparatu Agricolle Spray (rys. 5). Ze względu na obserwowaną stagnację wilgotnego powietrza i intensywność rozwoju objawów oprysk prowadzono przez 15 dni w odstępach 5-dniowych. Następnie 23 najlepiej rokujące rośliny przeniesiono do doniczek wypełnionych podłożem glebowym uprzednio naświetlanym promieniowaniem UV i zastosowano nawadnianie podsiąkowe w celu ograniczenia wilgotności w strefie nasady pędów.

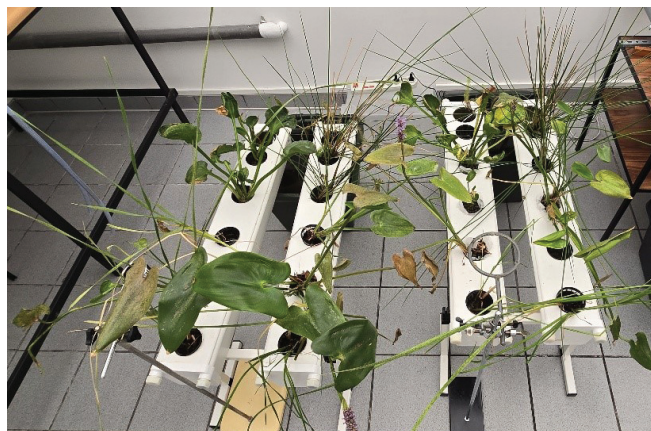


Rys. 5. Preparat Agricolle Spray wykorzystany w fazie wtórnych objawów grzybowych
Fig. 5. Agricolle Spray used during the phase of secondary fungal symptom development

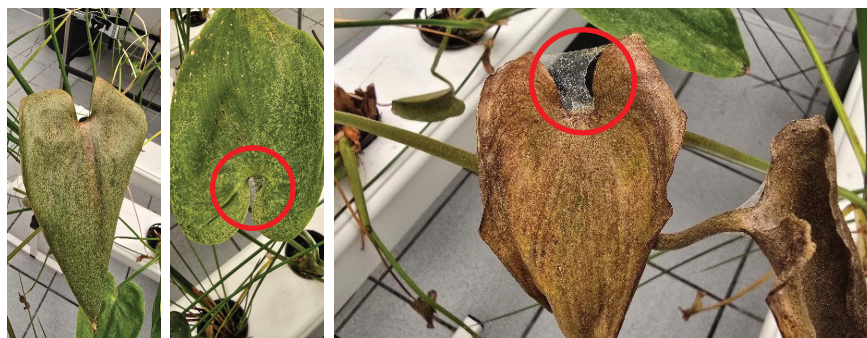
Po przeniesieniu roślin oprysk kontynuowano przez dwa tygodnie w odstępach 7-dniowych.

Wyniki

W trakcie badań prowadzonych w okresie letnim odnotowano silny rozwój *T. urticae*, któremu towarzyszyło pogorszenie kondycji roślin i destabilizacja układów hydroponicznych. Pierwszymi objawami były liczne nekrozy oraz gęste struktury pajęczynowe (rys. 6-8), na których widoczne były drobne roztocza. Po nasileniu objawów żerowania obserwowano obumieranie części biomasy znajdującej się w wodzie oraz intensywny rozwój zielonych glonów, wcześniej niewystępujących w takim nasileniu.



Rys. 6. Widok ogólny stanowiska hydroponicznego w fazie gradacji *T. urticae*. Widoczne zróżnicowanie w stopniu porażenia biomasy oraz symptomy stresu biotycznego u poszczególnych gatunków makrofitów
Fig. 6. General view of the hydroponic setup during the outbreak of *Tetranychus urticae*. Differences in the degree of biomass infestation and symptoms of biotic stress in individual macrophyte species are visible



Rys. 7. Objawy żerowania *T. urticae* na liściach *Pontederia cordata*. Widoczne chlorotyczne plamki (nakłucia) oraz charakterystyczna struktura pajęczyny pełniąca funkcję barierową
Fig. 7. Symptoms of *Tetranychus urticae* feeding on *Pontederia cordata* leaves. Chlorotic spots (feeding punctures) and the characteristic webbing structure acting as a protective barrier are visible



Rys. 8. Widoczne objawy żerowania *T. urticae* na liściach *Alisma plantago-aquatica*. Nekroza liści oraz pojawienie się struktury pajęczyny

Fig. 8. Visible symptoms of *Tetranychus urticae* feeding on *Alisma plantago-aquatica* leaves. Leaf necrosis and the appearance of webbing are visible

W celu obiektywizacji oceny stopnia porażenia roślin wprowadzono umowną wizualną skalę zasiedlenia (0-4), gdzie najwyższa wartość oznaczała całkowitą kolonizację i zaawansowane objawy morfologiczne (tab. 1).

W celu usunięcia *T. urticae* wdrożono i poddano ewaluacji trzy komplementarne procedury sanitarne: mechaniczną, opryskową oraz zintegrowaną metodę mechaniczno-opryskową. Równolegle, jako działanie bazowe o charakterze systemowym, przeprowadzono pełną dekontaminację instalacji hydroponicznej, obejmującą całkowitą wymianę medium wodnego oraz oczyszczenie powierzchni strukturalnych układu w celu eliminacji form przetrwalnikowych i jaj szkodnika z biofilmu. W pierwszej kolejności zaimplementowano metodę mechaniczną. Polegała ona na usunięciu roślin ze stanowisk wegetacyjnych i poddaniu ich intensywnemu płukaniu pod bieżącą wodą, połączonemu z delikatną manualną abrazją powierzchniową blaszki liściowej, łodyg oraz systemu korzeniowego przy użyciu gąbki.

Działanie to miało na celu fizyczne usunięcie stadiów ruchomych oraz oprzędów. Przeprowadzona inspekcja wykazała jednak niską efektywność długofalową tej procedury; po upływie 7 dni od zabiegu zaobserwowano wtórną rekolonizację, objawiającą się ponownym pojawieniem struktur pajęczynowych oraz postępującą chlorozą tkanki asymilacyjnej, co świadczyło o przetrwaniu populacji odpornej na zmywanie mechaniczne.

Odpowiedzią na niepowodzenie tej próby było wdrożenie metody opryskowej o charakterze fizyczno-kontaktowym z wykorzystaniem preparatu Agrocover Spray. Po bezpośrednim kontakcie preparatu z pajęczyną obserwowano zapadanie się i brązowienie jej struktur. Po zakończeniu cyklu oprysków, w okresie dwóch tygodni obserwacji, ponownie pojawiły się struktury pajęczynowe, co wskazywało na obecność niewyeliminowanych ognisk zasiedlenia.

Wobec niedostatecznej skuteczności pojedynczych działań zastosowano strategię zintegrowaną, obejmującą sekwencyj-

ne połączenie oczyszczania hydromechanicznego oraz aplikacji preparatu powłotowocznego na osuszoną biomasę roślinną przed jej ponownym umieszczeniem w zdezynfekowanym układzie. Połączenie mechanicznego usuwania stadiów szkodnika i struktur pajęczynowych z aplikacją preparatu miało na celu przerwanie jego cyklu rozwojowego.

Po zastosowaniu metody mechaniczno-opryskowej, równolegle z obniżeniem temperatury otoczenia do 25°C, w ciągu dwóch tygodni nie obserwowano nowych struktur pajęczynowych ani innych oznak ponownego zasiedlenia przez *T. urticae*. Rośliny zaczęły również rozwijać nowe liście. Ze względu na jednoczesną zmianę kilku czynników nie można jednak przypisać uzyskanego efektu wyłącznie zastosowanej metodzie mechaniczno-opryskowej. W kolejnej fazie na osłabionych tkankach rozwinęły się objawy kolonizacji grzybowej (rys. 9-12), które doprowadziły do obumarcia większości roślin.



Rys. 9. Widok mikroskopowy różowych kolonii obecnych na *Juncus effusus*

Fig. 9. Microscopic view of pink colonies observed on *Juncus effusus*



Rys. 10. Objawy kolonizacji grzybowej na łodydze makrofita w strefie kontaktu z lustrem wody. Widoczna degradacja tkanki oraz rozwój struktur grzybowych w obszarze strefy korzeniowej

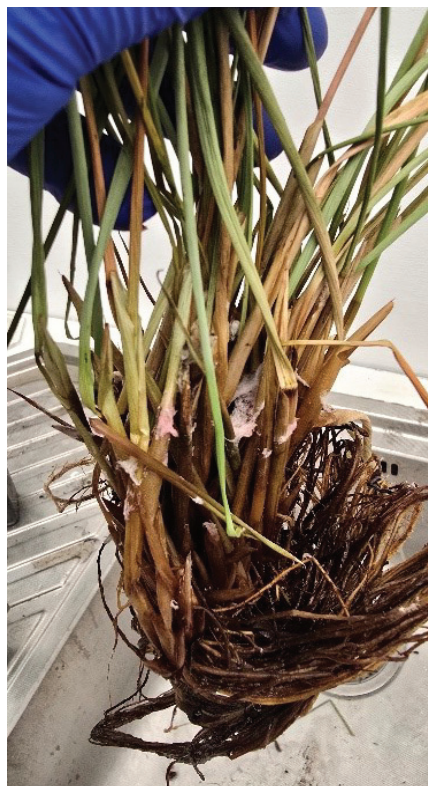
Fig. 10. Symptoms of fungal colonisation on a macrophyte stem at the waterline. Visible tissue degradation and development of fungal structures in the root-zone area

Tabela 1. Stopień zasiedlenia przez *T. urticae* i dynamika przeżywalności makrofitytów w kolejnych fazach zdarzenia

Table 1. Degree of infestation by *Tetranychus urticae* and macrophyte survival dynamics during successive phases of the event

Gatunek rośliny	Stopień zasiedlenia przez <i>T. urticae</i> (0-4)	Liczba roślin ocalałych po ataku <i>T. urticae</i>	Liczba roślin w fazie infekcji grzybowej	Przeżywalność końcowa w sztukach	Uwagi dotyczące rekonwalescencji
Rozplaw sercolistny (<i>Pontederia cordata</i>)	4	1	3 sztuki w tym jedna ocalała i dwie nowe	2	Infekcja grzybowa najintensywniej występowała na roślinach osłabionych przez pajęczaka
Pałka wąskolistna (<i>Typha angustifolia</i>)	3	2	6 sztuk w tym dwie ocalałe i cztery nowe	1	Przetwała jedna sadzonka należąca do partii uzupełniającej
Żabieniec babka wodna (<i>Alisma plantago-aquatica</i>)	2	2	2 sztuki ocalałe bez nowych sadzonek	0	Wszystkie rośliny uległy całkowitej degradacji w fazie inwazji grzybowej
Sit rozpierzchły (<i>Juncus effusus</i>)	1	4	12 sztuk uzyskanych z podziału czterech ocalałych	0	Gatunek nie przetrwał infekcji grzybowej mimo wysokiej regeneracji po ataku szkodnika

Objawy pojawiły się u wszystkich roślin w krótkim czasie po zastosowaniu lampy UV w pomieszczeniu laboratoryjnym. U nasady pędów powyżej lustra wody obserwowano białe kolonie, a u sita rozpięzchłego także różowawe zabarwienie dojrzałych kolonii (rys. 11).



Rys. 11. Różowawy nalot grzybowy na pędzie *Juncus effusus* w strefie nekrotycznej łodygi
Fig. 11. Pinkish fungal growth on a *Juncus effusus* shoot in the necrotic region of the stem



Rys. 12. Objawy obserwowane na pędach *J. effusus*: brązowienie i usychanie łodyg
Fig. 12. Symptoms observed on *J. effusus* shoots: browning and drying of stems

Mimo zastosowania preparatu Agri-colle Spray i przeniesienia roślin do podłoża glebowego (rys. 13) ich kondycja nadal się pogarszała, prowadząc do niemal całkowitej utraty zielonej biomasy. Fazę infekcji grzybowej przetrwały łącznie 3 z 23 roślin: 2 rozplawy sercolistne (jeden ocalały z etapu inwazji przedziorka i jeden nowo dodany) oraz 1 sadzonka pałki wąskolistnej. Odpowiada to przeżywalności 13% i śmiertelności 87% w tej kohorcie. Pozostałe rośliny uległy całkowitej degradacji w fazie infekcji grzybowej (rys. 14).



Rys. 13. Implementacja procedur ratunkowych: makrofity przeniesione z systemu hydroponicznego do podłoża stałego uprzednio naświetlanego promieniowaniem UV. Przeniesienie miało na celu ograniczenie kontaktu roślin z medium, w którym obserwowano objawy kolonizacji grzybowej
Fig. 13. Implementation of rescue procedures: macrophytes transferred from the hydroponic system to solid substrate previously exposed to UV radiation. The transfer was intended to limit plant contact with the medium in which signs of fungal colonisation had been observed



Rys. 14. Osobniki makrofity (m.in. *Pontederia cordata*) ocalałe po fazie infekcji grzybowej. Widoczna odbudowa biomasy pędowej
Fig. 14. Macrophyte specimens (including *Pontederia cordata*) that survived the fungal infection phase. Visible recovery of shoot biomass

Dyskusja

Obserwowany przebieg degradacji biomasy makrofity stanowi przykład sekwencyjnego nakładania się stresów biotycznych. W warunkach laboratoryjnych, w których temperatura powietrza osiągała 39°C, oddzielne stosowanie zabiegów mechanicznych lub opryskowych nie prowadziło do trwałego zahamowania objawów zasiedlenia przez *T. urticae*. Literatura wskazuje, że wysoka temperatura może sprzyjać szybkiemu rozwojowi populacji tego roztoczka, a struktury pajęczynowe mogą ograniczać kontakt preparatów ze szkodnikiem (Rioja i in., 2017). Znaczenie monitorowania temperatury w okresach sprzyjających gradacji podkreślają także Ulatowska i in. (2015).

Jakubowska i in. (2017) wykazali w warunkach laboratoryjnych wysoką skuteczność wybranych akarycydów i ich mieszanin w zwalczaniu *T. urticae* na buraku cukrowym. Bezpośrednie porównanie tych wyników z niniejszym studium przypadku jest ograniczone ze względu na odmienne warunki doświadczenia oraz zastosowanie różnych metod ochrony. W badanym układzie hydroponicznym priorytetem było

ograniczenie potencjalnej fitotoksyczności oraz wpływu działań interwencyjnych na medium wodne, dlatego stosowano przede wszystkim zabiegi mechaniczne i preparat o działaniu fizyczno-kontaktowym.

Brak obserwowanego nawrotu po zastosowaniu metody skojarzonej zbiegł się w czasie z mechanicznym oczyszczaniem roślin, aplikacją preparatu oraz obniżeniem temperatury. Ponieważ działania te wprowadzono równocześnie, nie można rozdzielić ich indywidualnego udziału w uzyskanym efekcie. W tym kontekście znaczenie poprawy kondycji fizjologicznej roślin w ograniczaniu presji *T. urticae* omawiają Tomczyk i Andryka (2016). Reakcja roślin na żerowanie *T. urticae* może różnić się między gatunkami, co znajduje odzwierciedlenie w zróżnicowanym przebiegu zasiedlenia obserwowanym w niniejszym studium przypadku.

Po ataku szkodnika obserwowano intensywny rozwój zielonych glonów, któremu towarzyszyło pogorszenie kondycji makrofity. Obserwacja ta wskazuje na zaburzenie równowagi biologicznej medium, jednak na jej podstawie nie można jednoznacznie określić mechanizmu ani kierunku zmian w bilansie azotu i fosforu.

Kolejnym etapem była wtórna kolonizacja grzybowa. Brak identyfikacji gatunkowej obserwowanych struktur grzybowych ogranicza możliwość wnioskowania o konkretnym patogenie i podkreśla znaczenie diagnostyki objawowej (Osowski, 2021).

Wysoka śmiertelność w kohorcie 23 roślin (87%) wskazuje na rozległy charakter problemu w układzie, ale sama w sobie nie pozwala stwierdzić, że infekcja ma charakter systemowy. Hara i in. (2018) wskazują na możliwość wykorzystania naturalnych inhibitorów rozwoju grzybów, jednak ich skuteczność zależy od warunków i stadium rozwoju choroby. Czasowa zbieżność nasilenia objawów grzybowych z zastosowaniem lampy UV może sugerować zmianę warunków mikrobiologicznych, lecz zależność ta wymaga odrębnej weryfikacji. Znaczenie pożytecznej mikroflory w integrowanej ochronie roślin omawia Kempka (2014).

Analiza przeżywalności oraz poziomu zasiedlenia wykazała, że w pierwszej fazie ataku *T. urticae* największym zasiedleniem odznaczała się *Pontederia cordata*, natomiast największą przeżywalność odnotowano u *Juncus effusus*. W zaawansowanej fazie infekcji grzybowej najwyższą przeżywalność odnotowano u *Pontederia cordata* (jeden osobnik ocalały z etapu przedziorka i jeden nowo dodany), podczas gdy wszystkie sadzonki *Juncus effusus* obumarły. Wyniki te opisują zróżnicowaną przeżywalność poszczególnych gatunków w kolejnych fazach zdarzenia, lecz ze względu na zmianę liczebności obsady i brak równoległych grup porównawczych nie stanowią podstawy do ilościowego porównania odporności gatunkowej.

Podsumowanie i wnioski

Po przeprowadzeniu szczegółowej analizy przebiegu inwazji *T. urticae* oraz następującej po niej infekcji grzybowej w systemach hydroponicznych, sformułowano następujące wnioski:

1. W okresie inwazji temperatura powietrza w laboratorium osiągała 39°C, co mogło sprzyjać szybkiemu rozwojowi *T. urticae*. Ze względu na brak aparaturowego pomiaru wilgotności powietrza jej udziału w przebiegu inwazji nie można jednoznacznie ocenić. Warunki termiczne współwystępowały z zakłóceniem realizacji pierwotnego celu badawczego dotyczącego zmian stężeń substancji biogennych w medium.
2. Przeprowadzone obserwacje wskazują na kaskadowy charakter stresu biotycznego. Osłabienie kondycji fizjologicznej roślin po żerowaniu przedziorka mogło sprzyjać późniejszemu rozwojowi kolonizacji grzy-

bowej. Objawy grzybowe pojawiały się najpierw i z największą intensywnością na egzemplarzach, które wcześniej przetrwały atak *T. urticae*.

3. Pogorszeniu kondycji makrofitytów towarzyszył intensywny rozwój zielonych glonów w medium wodnym. Obserwacja ta wskazuje na destabilizację biologiczną układu, jednak nie pozwala sama w sobie jednoznacznie określić zmian w pobieraniu ani uwalnianiu azotu i fosforu.

4. Obserwowana zbieżność czasowa między zastosowaniem promieniowania UV w laboratorium a nasileniem objawów kolonizacji grzybowej uzasadnia hipotezę, że zmiany warunków mikrobiologicznych mogły sprzyjać jej rozwojowi. Zależność ta wymaga jednak odrębnej weryfikacji doświadczalnej.

5. W fazie infekcji grzybowej przeżyły 3 z 23 roślin, co odpowiada przeżywalności 13% i śmiertelności 87% tej kohorty. Procedura ratunkowa obejmowała działania mechaniczne, zabiegi opryskowe oraz przeniesienie roślin do podłoża glebowego. Wcześniejsze żerowanie *T. urticae* mogło osłabić kondycję fizjologiczną części roślin i zwiększyć ich podatność na dalszy stres biotyczny.

6. W kolejnych fazach zdarzenia obserwowano zróżnicowaną przeżywalność badanych gatunków. W pierwszej fazie największe zasiedlenie odnotowano u *Pontederia cordata*, a największą przeżywalność u *Juncus effusus*. W fazie infekcji grzybowej przeżyły dwa osobniki *Pontederia cordata* (jeden ocalały z wcześniejszej fazy i jeden nowo dodany) oraz jedna sadzonka *Typha angustifolia*, natomiast wszystkie sadzonki *Juncus effusus* obumarły. Ze względu na zmianę liczebności obsady oraz obecność nowo dodanych roślin wyniki należy traktować opisowo i nie interpretować ich jako bezpośredniego porównania odporności gatunkowej.

Podziękowania

Publikacja została sfinansowana z dotacji statutowej Politechniki Częstochowskiej, Wydziału Infrastruktury i Środowiska

Bibliografia

- [1] Cook, R. J., i Baker, K. F. (1983). The nature and practice of biological control of plant pathogens. American Phytopathological Society.
- [2] Godzina-Sawczuk, M. (2013). Analiza powiązań między roślinami pomidora odpornymi na nicienie i szkodnikami ze szczególnym uwzględnieniem przedziorka chmielowca (*Tetranychus urticae* Koch, Acari: Tetranychidae) [Rozprawa doktorska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie]. Repozytorium SGGW. <https://bw.sggw.edu.pl/info/phd/648647184a28bf1384e429b2b7ab/>

- [3] Grzegorzczak, M., Szalewicz, A., Żarowska, B., Połomska, X., Wątopek, W., i Wojtatowicz, M. (2015). Drobnoustroje w biologicznej ochronie roślin przed chorobami grzybowymi. Acta Scientiarum Polonorum Biotechnologia, 14(2), 19–42. <https://actascipol.upwr.edu.pl/pl/full/3/2015/000030201500014000020001900042.pdf>
- [4] Hara, P., Szparaga, A., i Czerwińska, E. (2018). Ekologiczne metody zwalczania grzybów powodujących choroby roślin uprawnych. Rocznik Ochrona Środowiska, 20, 1764–1775. https://www.ros.edu.pl/images/roczniki/2018/104_ROS_V20_R2018.pdf
- [5] Jakubowska, M., Fiedler, Ż., i Bocianowski, J. (2017). Możliwości wykorzystania akaricydów oraz ich mieszanin do zwalczania przedziorka chmielowca (*Tetranychus urticae* Koch) w uprawach buraka cukrowego – badania laboratoryjne. Progress in Plant Protection, 57(1), 75–81. <https://doi.org/10.14199/ppp-2017-013>
- [6] Kempka, J. (2014). Biologiczna ochrona roślin przed chorobami jako element integrowanej ochrony roślin. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, Oddział w Krakowie. https://cdr.112.e-kei.pl/cdr/images/2014/biologiczna_ochrona.pdf
- [7] Mazurek, J., i Nowik, K. (2018). Profilaktyka chorób drzew miejskich. Zalecenia bio-asekuracji. Fundacja EkoRozwoju. <https://drzewa.org.pl/wp-content/uploads/2019/02/choroby-drzewpodglad.pdf>
- [8] Osowski, J. (2020). Szkodniki ziemniaka – występowanie, objawy i zwalczanie. Ziemniak Polski, (4), 10–33. <https://bibliotekanauki.pl/articles/2135416>
- [9] Osowski, J. (2021). Diagnostyka objawów – istotnym czynnikiem zwalczania agrofagów. Ziemniak Polski, (3), 12–25. <https://bibliotekanauki.pl/articles/2135345>
- [10] Rijoia, C., Zhurov, V., Bruinsma, K., Grbic, M., Grbic, V. (2017). Plant-herbivore interactions: A case of an extreme generalist, the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae*. Molecular Plant-Microbe Interactions, 30(12), 935–945. <https://doi.org/10.1094/MPMI-07-17-0168-CR>
- [11] Tomczyk, A., i Andryka, P. (2016). Effectiveness of Swirski-mite (*Amblyseius swirskii* Athias-Henriot) in control of two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae* Koch) on cucumber plants treated with biostimulants. Progress in Plant Protection, 56(2), 175–179. <https://doi.org/10.14199/ppp-2016-029>
- [12] Tomczyk, A., Czajkowska, M., i Elkner, J. (2012). Interactions between two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae* Koch) and western flower thrips (*Frankliniella occidentalis* Pergande) on cucumber plants treated with selected biostimulants. Progress in Plant Protection, 52(2), 235–239.
- [13] Ulatowska, A., Górski, D., i Piszczek, J. (2015). Ocena stanu zagrożenia plantacji buraka cukrowego przez przedziorka chmielowca (*Tetranychus urticae* Koch) w województwie kujawsko-pomorskim. Zagadnienia Doradztwa Rolniczego, (4), 125–132. <https://zdr.cdr.gov.pl/images/ZDR/2015/ZDR-2015-4.pdf>
- [14] Weidner, S. (2015). Wykorzystanie analiz proteomicznych do wyjaśnienia biologicznych podstaw tolerancji stresów u roślin. Acta Scientiarum Polonorum Biotechnologia, 14(2), 43–56.
- [15] Zhang, Y., Hu, Y., Yang, B., Ma, F., Lu, P., Li, L., Wan, C., Rayner, S., i Chen, S. (2010). Duckweed (*Lemna minor*) as a model plant system for the study of human microbial pathogenesis. PLOS ONE, 5(10), e13527. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013527>