

Robert Borek

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

WPLYW ZADRZEWIEN ŚRÓDPOLNYCH I SYSTEMÓW ROLNO-LEŚNYCH NA BILANS WODNY POLA*

Słowa kluczowe: agroleśnictwo, systemy rolno-leśne, zadrzewienia, bilans wodny, parowanie, transpiracja

Wstęp – zagadnienia bilansu wodnego w skali pola

Analizując krążenie wody w przyrodzie, należy rozpatrywać łącznie bilans promieniowania, bilans ciepła oraz bilans wody, ponieważ przekazywanie energii, ciepła i wody jest ze sobą zależne. Analizując krążenie wody w przyrodzie, należy więc rozpatrywać łącznie bilans promieniowania, bilans ciepła oraz bilans wody. Zgodnie z zasadą zachowania energii, w układzie odosobnionym suma wszystkich rodzajów energii jest stała w czasie – energia nie może być utworzona ani zniszczona. Ilość energii słonecznej, jaka jest odbijana od powierzchni Ziemi zależy głównie od nasłonecznienia i kąta padania promieniowania oraz od charakterystyki pokrycia gruntu. Niskie wartości albedo (stosunek promieniowania odbitego do padającego) posiadają woda (0,03–0,10) czy gleby ciemne i wilgotne (0,05–0,10), natomiast zielone uprawy polowe (0,20–0,25), łąka zielona (0,23), gleba jasna sucha (0,20–0,30) wykazują wyższe zdolności odbijania promieniowania. W warunkach Polski albedo dla lasów waha się od 0,12–0,15 dla lasów iglastych do 0,18–0,21 dla lasów liściastych (35).

Ilość energii termicznej zgromadzonej przez ciało lub przekazywanej pomiędzy dwoma ciałami/cząsteczkami/atomami jest nazywana ciepłem. Przy przejściu energii z jednego układu do drugiego zawsze musi istnieć różnica temperatur. W przypadku zmiany stanu skupienia ciała mówimy o cieple utajonym – to jest ilości

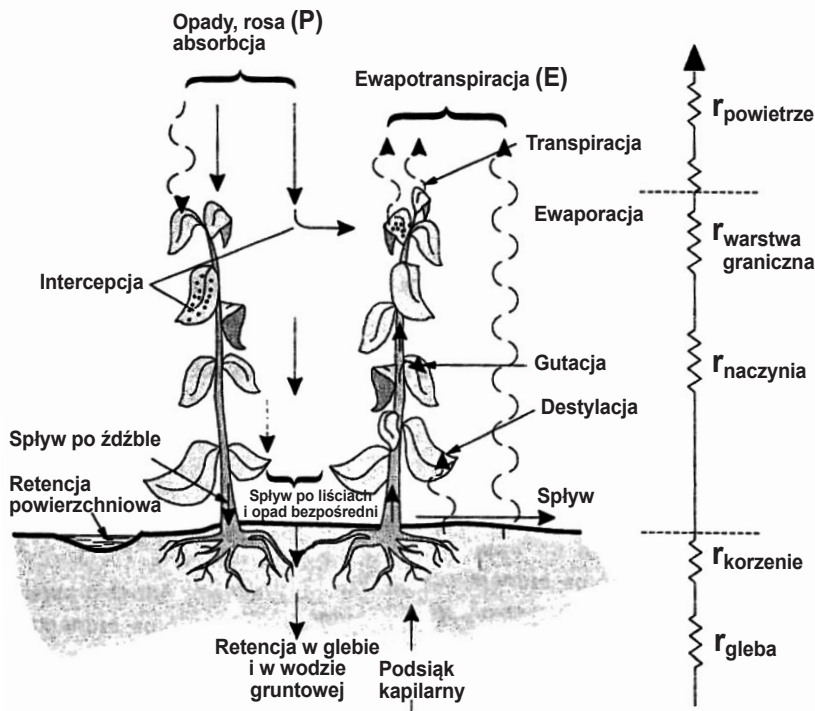
*Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2. pt. „Kształtowanie retencji gleb jako elementu przeciwdziałania suszy rolniczej i racjonalnej gospodarki wodnej” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2023 r.

energii potrzebnej do zmiany tego stanu. Możemy również powiedzieć, że jest to ciepło parowania lub energia wykorzystana w procesie parowania. Można założyć, że ponad 70% energii promienistej dochodzącej do zbiorowiska roślinnego (powierzchni czynnej) zostaje zamienione na energię cieplną lub wykorzystane, głównie w procesie transpiracji, na wymianę z otoczeniem (35). Powierzchnia czynna to każda powierzchnia (gleba, szata roślinna), przez którą przepływa masa i energia. Upraszczając – poza promieniowaniem, pomiędzy powierzchnią czynną ekosystemu a atmosferą następuje głównie wymiana w postaci dwóch strumieni: ciepła jawnego (odczuwalnego) i ciepła utajonego. Ciepło odczuwalne jest przekazywane od atmosfery w kierunku szaty roślinnej, nagrzewając ją, bądź jest uwalniane przez powierzchnię czynną w kierunku atmosfery. W ciągu dnia powierzchnia czynna mocno się nagrzewa, znacznie szybciej niż powietrze, z tego powodu ciepłe powietrze ogrzewa się od podłoża, a następnie unosi się w wyniku konwekcji (samoistne unoszenie się ciepłego powietrza). Z kolei w nocy powierzchnia intensywnie się wychładza w wyniku wypromieniowywania ciepła, a od niej wychładzają się przygruntowe warstwy powietrza. Ponieważ powietrze ochładza się znacznie wolniej niż podłoże, następuje przepływ ciepła w kierunku powierzchni Ziemi. Część ciepła odczuwalnego jest ciepłem przewodzonym w gruncie/glebie.

Strumienie salda promieniowania, ciepła odczuwanego, glebowego i jawnego są od siebie zależne, ale w pierwszej kolejności energia jest przekazywana w procesie parowania (ciepło utajone). Obowiązuje zasada priorytetu parowania (35). Jeżeli w podłożu występuje dostateczna ilość wody, najpierw energia pokrywa potrzeby procesu parowania, a potem dopiero ogrzewania powietrza i gleby. Suma parowania z gleby i transpiracji roślin (ewapotranspiracja) zależy od wielu czynników, m.in.: salda promieniowania, sumy i rozkładu opadów atmosferycznych, temperatury, niedosytu wilgotności powietrza, pokrycia terenu, gatunku rośliny, prędkości wiatru, stosunków wodnych w glebie.

Parowanie prowadzi do ochłodzenia powierzchni parującej, ale także do strat zapasów wody w glebie. Przepływ strumienia parującej wody w systemie gleba–roślina–atmosfera jest ograniczony kaskadą oporów stawianych przez roślinność. Gęstość strumienia jest wprost proporcjonalna do gradientu siły powodującej przepływ, a odwrotnie do oporu, jaki stawia przepływowi ośrodek. Całkowity opór roślinności jest nazywany oporem sklepienia szaty roślinnej (ang. *canopy resistance*, r_c) i można go przedstawić analogicznie do oporu przepływu prądu (rys. 1) (35). Na ten opór składają się między innymi: opór gleby (przepływ wody z gleby z miejsc wilgotniejszych do otoczenia korzenia), opór korzeniowy (opór wnikania wody do korzeni), opór naczyniowy (opór przepływu wody w wiązce naczyniowej), opór liściowy (opór przepływu wody w tkankach liścia) i opór szparkowy (opór przejścia pary wodnej z wnętrza liścia do atmosfery). Najważniejszymi czynnikami przepływu wody z rośliny do atmosfery są: gradient potencjału wody pomiędzy rośliną a powietrzem, na który wpływa niedosyt wilgotności powietrza, stopień otwarcia szparek oraz opór

korzeniowy spowodowany spadkiem wilgotności gleby. Ogólnie biorąc, zarówno wielkość parowania gleby, jak i transpiracji rośliny dynamicznie zmieniają się w sezonach oraz w zależności od pory dnia i warunków meteorologicznych.

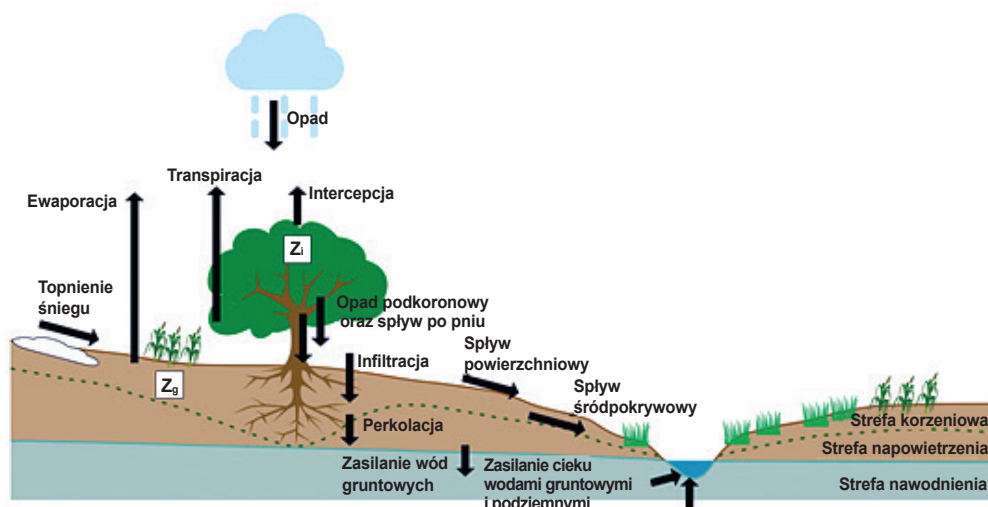


Rys. 1. Kaskada oporów, jakie musi pokonać strumień pary wodnej przepływający z gleby do atmosfery przez roślinę

Źródło: Kędziora, 1999 (35)

Oprócz parowania ważnymi składowymi obiegu wody w przyrodzie są: opad, intercepcja, retencja, spływ powierzchniowy, gruntowy oraz infiltracja (rys. 2). Intercepcja jest procesem zatrzymywania się wody opadowej na powierzchni liści, konarów, pni drzew i pędów roślin. Przechwycony opad można traktować jako straconą wielkość opadu, jeśli na przykład korona drzewa konkuruje ze znajdującą się w pobliżu roślinnością uprawną lub wyparowana w ten sposób woda zmniejsza zasilenie wód gruntowych lub przepływ wód powierzchniowych w zlewni. Można też uznać, że jej dostępność dla parowania ogranicza zużycie wody transpirowanej z gleby. Wielkość intercepcji zależy głównie od powierzchni liści, niedosytu wilgotności powietrza oraz charakteru opadów (mała intensywność, krótki czas trwania). Na wielkość wody opadowej, która dotrze do gleby znaczący wpływ ma struktura roślinności drzewiastej – zwłaszcza budowa koron i powierzchnia pnia. Pnie drzew o szorstkiej korze bardziej zwiększają opór powierzchniowy podczas spływu po roślinie niż pnie gładkie. Retencja (maga-

zynowanie wody opadowej na powierzchni ziemi, gruncie oraz w zbiornikach) jest szczególnie istotna dla zatrzymania opadów na potrzeby wykorzystania przez rośliny. Jej zapasy mogą być utracone z ekosystemu powierzchniowo lub przez parowanie. Rola spływu powierzchniowego zależy od lokalnych uwarunkowań mikroklimatu, rzeźby terenu i roślinności – chociaż zasila wody powierzchniowe, może być przyczyną gwałtownych wezbrań rzek, erozji i osuwisk gruntów lub suszy. Infiltracja to przemieszczanie się wód powierzchniowych i opadowych w głąb gruntu, opóźnia ona obieg wody, jest na ogół procesem korzystnym dla bilansu wodnego.



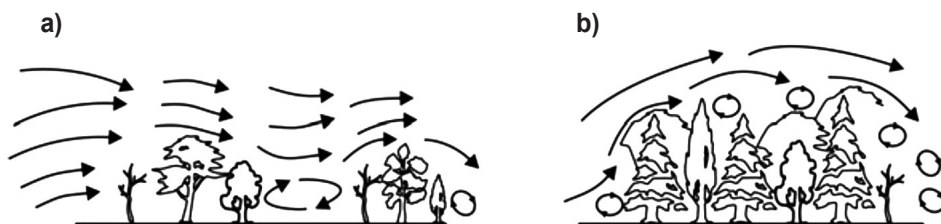
Rys. 2. Schemat bilansu wodnego zlewni, gdzie Z_i to zapas wody zakumulowanej na potrzeby intercepcji, natomiast Z_g – zapas wody glebowej w strefie napowietrzzonej na potrzeby ewapotranspiracji roślin. Dostępność wody dla roślin można analizować w perspektywie cykli o różnej długości: 1. W okresie krótkoterminowym jest wypadkową warunków pogodowych i zależy od czasu trwania fazy zasilania opadami (kilka–kilkadziesiąt godzin) oraz czasu trwania fazy ubytków wody (kilka–kilkanaście dni); 2. W okresie sezonowym, w zależności od przebiegu pór roku; 3. W okresie długoterminowym, wskutek zmian użytkowania gruntów lub dynamiki rozwoju drzewostanu

Źródło: opracowanie własne

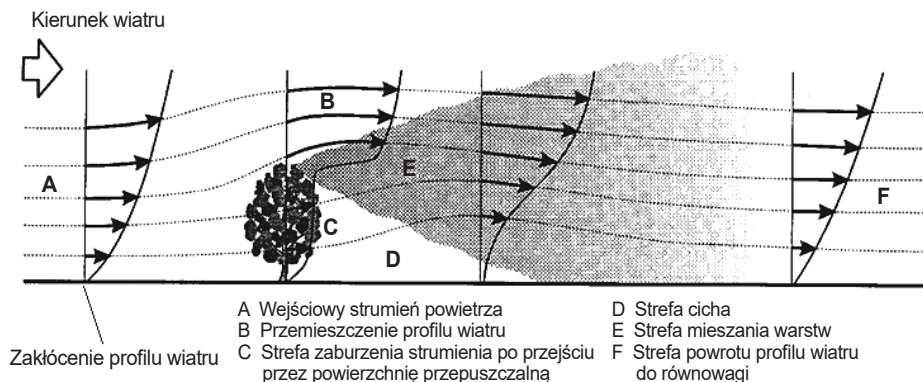
W omawianej powyżej wymianie energii z atmosferą rozpatruje się jedynie ruch pionowy powietrza suchego, wilgotnego lub nasyconego parą wodną (wypływanie lżejszego powietrza w cięższej masie powietrza lub zatapianie się powietrza cięższego w lżejszej masie powietrza). Stan ten jest zaburzony w przypadku ruchów poziomych powietrza, powiązanych z adwekcją (napływanie powietrza o określonych właściwościach nad dany obszar). Wiatr oddziałuje na rośliny nie tylko przez zwiększenie parowania z powierzchni roślin oraz transpiracji, ale również powoduje zmiany

morfologiczne (zwiększenie grubości pędów/łodyg, skrócenie wysokości rośliny i zmniejszenie powierzchni liści), hormonalne oraz fizyczne tkanek przez naprężenia i zranienia przenoszonym materiałem oraz na skutek niesionych prądami powietrza mikroorganizmów (12).

Fizyka oddziaływania wiatru jest następująca. Energia słoneczna i siła przyciągania Słońca wywołują ruch mas powietrza składających się na cyrkulację atmosfery i regionalne układy ciśnienia. W warstwie przypowierzchniowej atmosfery (30–50 m) pionowy profil prędkości wiatru kształtuje się warstwowo, zwiększając prędkość wraz z wysokością, ponieważ hamujący wpływ tarcia powierzchni maleje w górę. Wiatr, przepływając nad gładką powierzchnią czynną (na przykład łanem trawy), pozostaje z nią w równowadze dynamicznej, osiągając przy niej prędkość równą zeru. Jeśli zmienia się charakter podłoża (zwiększa się szorstkość) na jego skraju, profil wiatru ulega zakłóceniu i przemianie (rys. 3). Ponieważ siła tarcia powietrza z powierzchnią rośnie, zwiększa się liczba zawirowań. Powietrze przekazuje ku powierzchni pewną ilość pędu, jednocześnie zabierając od niej energię i materię w formie gazowej (np. wodę, dwutlenek węgla). W przypadku przeszkody w postaci odosobnionych skupisk drzew tworzą się wiry powietrza o osi poziomej. Ich średnica, zasięg i prędkość zależą od wielkości przerw między drzewami, wysokości drzew oraz prędkości poziomego ruchu powietrza. W przypadku przepływu strumienia powietrza nad zwartym skupiskiem drzew część strumienia przepływa ponad lasem ze znacznie zwiększoną prędkością, a część w postaci wirów osiada między drzewami. Po minięciu przeszkody, prędkość gwałtownie opada. Po stronie zawietrznej występuje strefa cicha (strefa zastoju powietrza). Zawirowania po przekroczeniu zadrzewień pasowych o odpowiedniej strukturze (rys. 4) mogą doprowadzić do utworzenia strefy mieszania warstw, gdzie strumienie energii są niezależne od wysokości, prędkość wiatru jest niższa, a wilgotność powietrza wyższa niż w układzie warstw z gradientem. Wzrost stężenia pary wodnej ogranicza wymianę tego gazu pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą. Po uzyskaniu pewnej odległości, która jest odmienna dla różnych przeszkód, wiatr uzyskuje równowagę dynamiczną z podłożem (35, 63). Poziomy ruch powietrza może więc prowadzić zarówno do wzrostu parowania szaty roślinnej i gleby w obrębie przeszkody, jak też do jego ograniczenia w odpowiedniej odległości.



Rys. 3. Wpływ podłoża na wiatr – zawirowania powietrza przepływającego: a) nad odosobnionymi skupiskami drzew; b) nad większym obszarem leśnym o różnym zagęszczeniu i wysokości



Rys. 4. Wpływ zadrzewienia rzędowego o optymalnym współczynniku porowatości na pionowy profil wiatru w neutralnych warunkach atmosferycznych

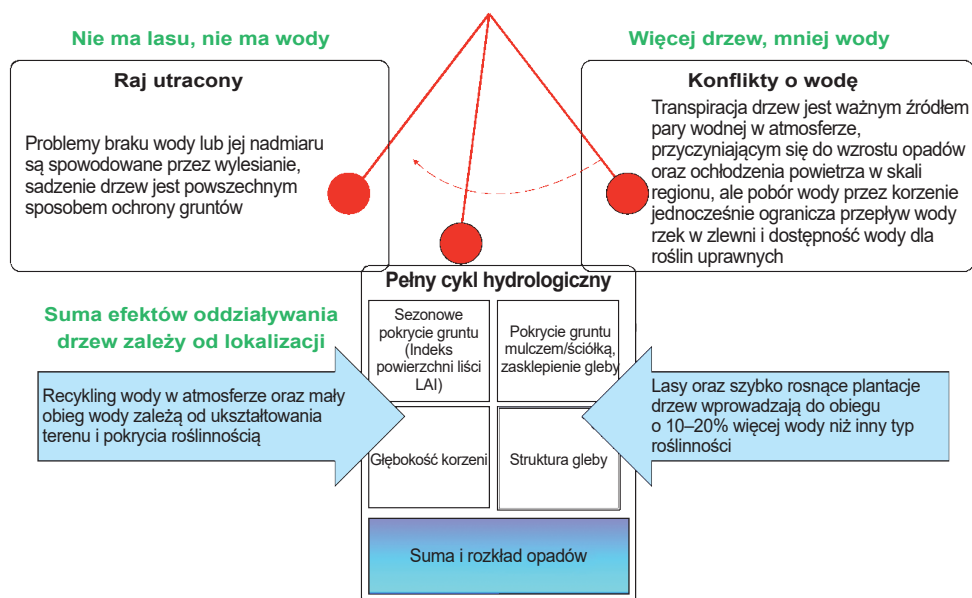
Źródło: Judd i in., 1996 (33)

Rozkład opadów i użytkowanie gruntu mają decydujący wpływ na strukturę bilansu cieplnego – udział parowania i ciepła jawnego. Wilgotne lasy i użytki zielone wykorzystują najwięcej energii na parowanie, zaś grunty orne, suche użytki zielone i sady tracą energię głównie na ogrzewanie powietrza (35). W zależności od klimatu, fragmentacji i układu struktury użytkowania gruntów w krajobrazie przepływ energii i materii może być spowolniony lub przyspieszony.

Wpływ użytkowania gruntu na bilans wodny może być także zróżnicowany. Zadrzewione i zadarnione obszary zwykle ograniczają spływ powierzchniowy, ale również w warunkach dostępności wody glebowej zwiększają w różnym stopniu parowanie. Z drugiej strony zadrzewienia w mozaikowym krajobrazie chronią przed stratą wody z sąsiadujących użytków rolnych. Prędkość wiatru obniża się średnio ok. 20% w zakresie 60–240 m odległości od brzegu zadrzewionego obszaru (53). W homogenicznym krajobrazie rolniczym, o dużym udziale gruntów ornych w całkowitej powierzchni, skupiska drzew lokalnie zwiększają parowanie w skali krajobrazu z powodu adwekcji (rys. 3), jednak pasy zadrzewień o odpowiednim wskaźniku przepuszczalności wiatru mogą oddziaływać pozytywnie na zachowanie wody w glebie upraw rolnych (rys. 4).

Woda i drzewa

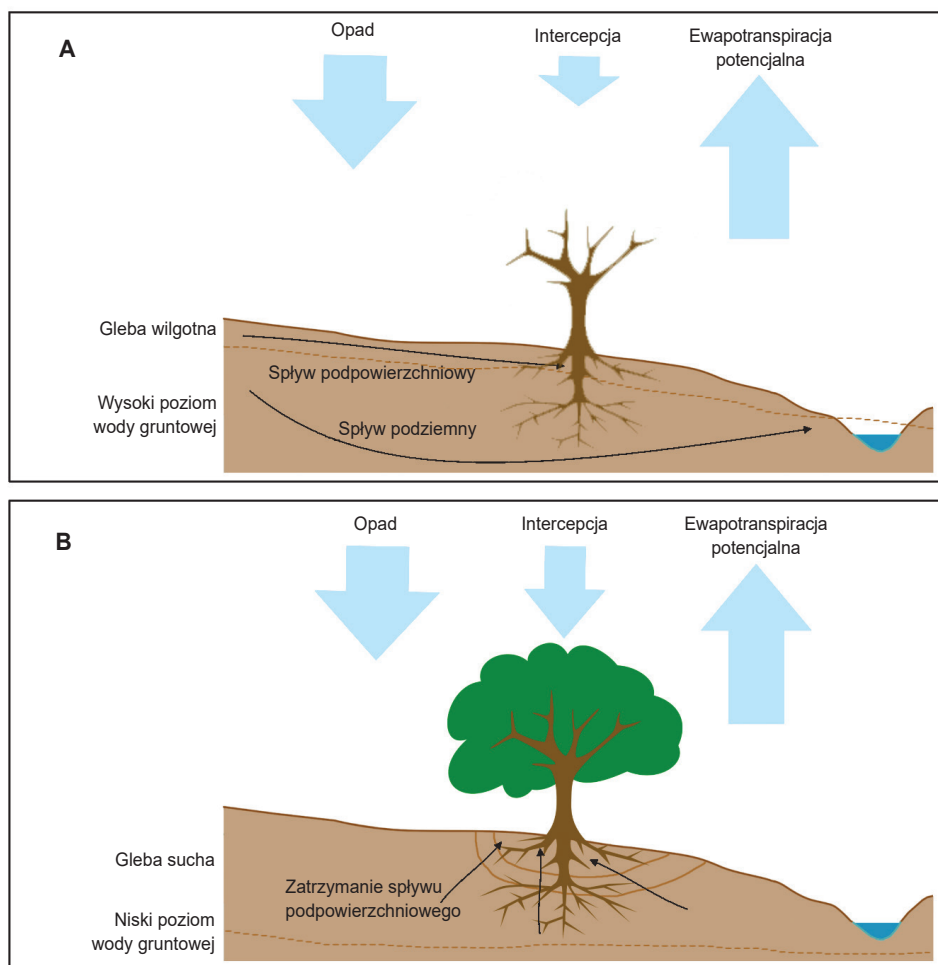
Zwykle drzewa zużywają na intercepcję i transpirację znacząco więcej wody niż większość pozostałych typów zbiorowisk roślinnych. Często dzieje się to kosztem zasobów wody gruntowej, do których mają dostęp głębsze korzenie drzew (68). Obecny stan wiedzy na temat cyklu hydrologicznego potwierdza, że rola drzew zależy jednak od lokalnego kontekstu, w szczególności topografii, gleby i jej okrywy oraz od zmienności parametrów meteorologicznych klimatu w skalach roku oraz wielolecia (rys. 5).



Rys. 5. Drzewa pełnią ważną rolę w regulacji cyklu hydrologicznego i pozostają głównym elementem dyskusji o racjonalnym gospodarowaniu wodą na potrzeby człowieka

Źródło: van Noordwijk i in., 2019, zmodyfikowane (60)

Uznaje się, że drzewostany znacząco przyczyniają się do recyrkulacji pary wodnej tworzącej opady (recykling wilgoci), co może mieć istotny wpływ na sumę i rozkład opadów atmosferycznych w regionie (30). Przepływ wody z gleby do atmosfery jest szczególnie silny w przypadku luźno rozmieszczonych drzew lub żywopłotów, podlegających procesowi adwekcji (p. definicja powyżej), rosnących na glebach ciężkich, o wysokim poziomie wód gruntowych. W takich uwarunkowaniach i przy nachyleniu terenu drzewa mogą zatrzymać przepływ podpowierzchniowy wód i zwiększyć infiltrację w sezonie letnim roku suchego nawet do 3 miesięcy (26, 27) (rys. 7), a wykorzystanie opadów może sięgać 115–140% (58). Polskie obliczenia wykonane przez Ryszkowskiego i Kędziórę (51) wykazały, że im cieplejsza pogoda i płytszy poziom wód gruntowych, tym więcej wody było wykorzystywane przez pasy wiatrochronne w okolicach Turwi ze strefy nasyczonej gleby – udział wody gruntowej w ewapotranspiracji dochodził do 44%. Większość ciepła na parowanie przeciwwietrznych zadrzewień pochodziło z przepływu ciepłych strumieni powietrza (adwekcji) – według autorów pracy do 40% więcej niż energii z promieniowania słonecznego. Symulacje wyjaśniły wpływ zadrzewienia na redukcję przepływu wody podpowierzchniowej o 28% w warunkach bezchmurnych na stoku o bardzo łagodnym nachyleniu. W obecnych uwarunkowaniach Wielkopolski większość drzew na badanym obszarze nie ma prawdopodobnie dostępu do wód gruntowych, więc stosunki wodne się pogorszą, a wielkość parowania drastycznie się obniży (50).



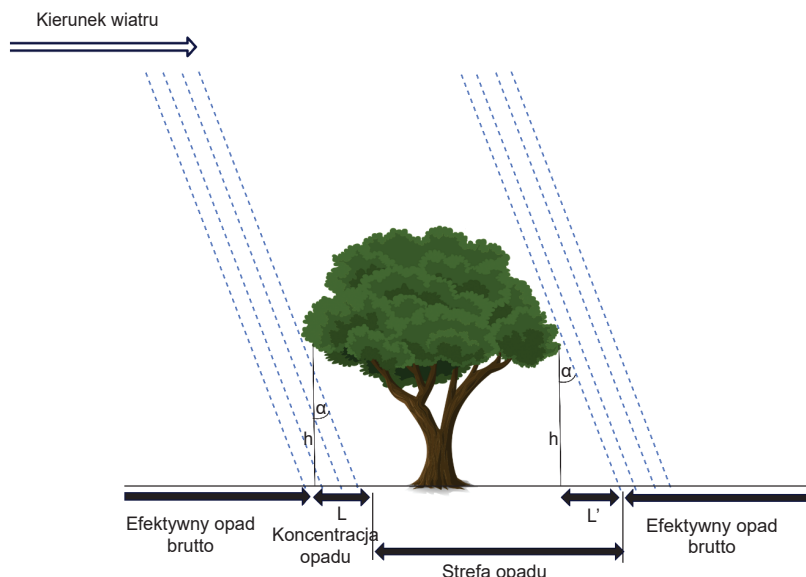
Rys. 7. Rząd drzew lub żywopłot mogą mieć poważny wpływ na poziom występowania wód gruntowych w przypadku ich wysokiego poziomu na glebach ciężkich. A. Bezlistne drzewa liściaste nie oddziałują znacząco zimą na przepływ wody w glebie. B. Drzewa w sezonie wegetacji zwiększają pobór wody opadowej parującej z liści (intercepcja) oraz pobór wody gruntowej (transpiracja). W warunkach wysokiego zapotrzebowania suchej atmosfery na parowanie dochodzi do zatrzymania spływu podpowierzchniowego i w efekcie obniżenia poziomu wód gruntowych. Zwykle obserwuje się większą wilgotność gleby pod drzewem w wyższej strefie zbocza niż w niższej, na skutek depozycji wymytej gleby i mniejszej aktywności korzeni powyżej drzewa (26, 30). Warto zaznaczyć, że gwałtownie rośnie powierzchnia gruntów w Polsce, gdzie korzenie drzew nie mają w ogóle dostępu do wód gruntowych (50)

Za spadek ilości wody w glebie odpowiada również intercepcja liści drzew tworząca zjawisko cienia opadowego (rys. 8). Przechwytywanie opadów przez liście

zmniejsza dostępność wody w glebie dla sąsiadujących roślin. W efekcie intercepcji i transpiracji strefa oddziaływania żywoplotów zlokalizowanych na stoku może sięgać do 9 metrów w górę zbocza oraz do 6 metrów w dół zbocza (26).

Drzewa dostarczają glebie ściółkę oraz obumarłą biomasę odnawiających się korzeni, stymulując w ten sposób aktywność organizmów glebowych, co polepsza strukturę gleb (w szczególności zwiększa makroporowatość) i w efekcie zwiększa retencję wierzchniej warstwy i przesiąkanie wody w głąb profilu glebowego.

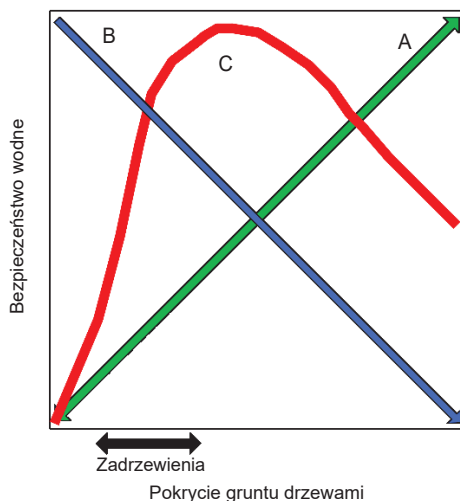
Jednak w ogólnym ujęciu, w efekcie działania korzeni drzew mniej wody dociera, spływając po powierzchni, do rzek, co może prowadzić do znacznego obniżenia ich przepływu w zadrzewionej zlewni. Z drugiej strony wody rzek mogą być w mniejszym stopniu zanieczyszczone cząsteczkami gleb wymytymi w wyniku erozji oraz pozostałościami pestycydów lub związkami mineralnymi z nawozów stosowanych na obszarach zlewni użytkowanych rolniczo. Ponadto, na glebach zbitych i ciężkich oraz poddanych zasklepieniu, gdzie bardzo szybko dochodzi do spływu powierzchniowego wód opadowych, drzewa przeciwdziałają powodziom. Chociaż metaanaliza wykonana przez Carricka i in. (15) dla północno-zachodniej Europy wyraźnie stwierdza, że wzrost powierzchni pokrycia zlewni drzewami nie ma znaczącego wpływu na ograniczenie ryzyka powodzi i zaleca podjęcie wielokierunkowych interwencji w użytkowaniu gruntów.



Rys. 8. Cień opadowy. Po stronie zawietrznej powstaje krótki odcinek cienia opadowego ograniczającego dostępność wody. Po stronie dowietrznej opad może zwiększyć dostępność wody, spływając w znacznej ilości po koronach drzew i pniu

Źródło: opracowanie własne

Podsumowując, w krótkim okresie drzewa mogą niekorzystnie oddziaływać na zlewnię, ale w dłuższej perspektywie czasowej, zwłaszcza jeśli są odpowiednio rozmieszczone w krajobrazie, poprawiają jakość wody oraz regularność przepływów cieków, a przy odpowiednich uwarunkowaniach struktury roślinności przyczyniają się również do poprawy mikroklimatu. Bezpieczeństwo wodne ludzi jest więc kwestią racjonalnego gospodarowania gruntami i ich pokrycia przez drzewa w stopniu zależnym od lokalnych uwarunkowań i potrzeb (rys. 6).



Rys. 6. Zobrazowanie konfliktu pomiędzy potrzebą zadrzewienia a bezpieczeństwem wodnym ludzi.

- A. Każda utrata drzew oznacza utratę bezpieczeństwa wodnego; B. Koncentracja zarządzania na wzroście odpływu jednostkowego w zlewni oznacza minimalizację zużycia wody przez drzewa; C. Zrównoważenie pełnego cyklu hydrologicznego wymaga optymalizacji gospodarowania gruntami, w tym zadrzewiania/zalesiania w zależności od lokalnych uwarunkowań dostępności, przepływu i jakości wody

Źródło: van Noordwijk i in., 2019 (60)

Rozpatrując bilans wodny w skali lokalnej, warto zwrócić uwagę na bardziej szczegółowe aspekty funkcjonowania drzew:

1. Przechwytywanie wody opadowej przez liście (intercepcja) zależy od struktury łanu roślinności (wskaźnik powierzchni liści, architektura łanu, kąty ułożenia liści) oraz charakterystyki ulistnienia (kształt i zakończenia liści, pokrycie włoskami i kutikulą oraz ich ruch w ciągu doby). Kompleksowość intercepcji wody jest problematyczna w ocenie wielkości tej składowej bilansu.
2. Rośliny bardzo różnie reagują na stres suszy. W przypadku drzew wynika to z odmiennej anatomii drewna różnych gatunków. Zmiana klimatu objawiająca się wzrostem temperatury powietrza lub stężenia dwutlenku węgla może zwiększyć

szać zdolność fotosyntezy roślin, obniżać przewodnictwo szparkowe wody albo wywierać jeszcze inne skutki. Wpływ zmiany klimatu na poszczególne gatunki nie jest w pełni poznany.

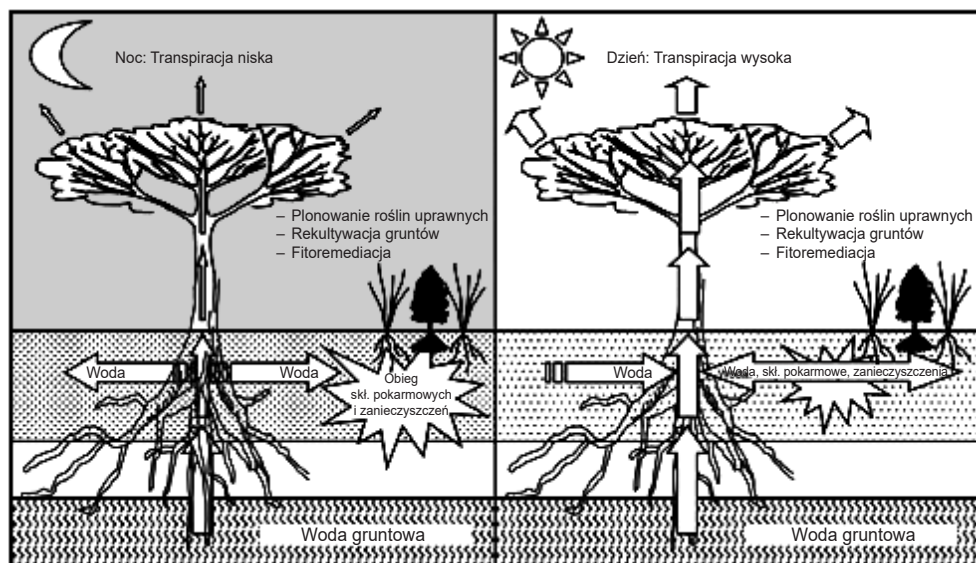
3. Ewapotranspiracja, transportując energię (ciepło utajone), ochładza organizm. Mechanizmy regulacji temperatury oraz przepływu wody przez szparki różnią się znacząco pomiędzy gatunkami. Oslona roślin przed wiatrem może zwiększyć temperaturę liści i prężność pary wodnej w ich komórkach, zwiększając gradient jej ciśnienia względem szparek i transpirację. Takie zjawisko może zajść w warunkach ograniczonej dostępności wody w glebie, szczególnie w strefie cichej strefy zawietrznej i w przypadku gatunków cechujących się wysokim oporem szparkowym, chociaż opór ten zwykle przeciwdziała tym zmianom.
4. Ilość i jakość ściółki, poprawiającej strukturę gleb i infiltrację zależy od wskaźnika powierzchni liści, okresu ulistnienia drzewa, składu chemicznego liści oraz warunków ich rozkładu.
5. Na udział makroporów oraz ruch wody w glebie wpływa struktura korzeni, dynamika ich rozkładu oraz działalność organizmów glebowych (np. dżdżownic) stymulowanych przez związki wydzielane przez biomasę drzewa. Drzewa wolno stojące oddziałują głównie w pasie wilgotniejszej gleby w zakresie 2-krotności rzutu korony +2,0–2,5 m. Większość drzew rosnących w siedliskach naturalnych posiada system korzeniowy do głębokości 1,5–1,6 m; przy niższym poziomie wód gruntowych korzenie rozwijają się znacznie głębiej.
6. Gatunki drzew różnią się pod względem redystrybucji wody w glebie. Posiadają różne strategie dzielenia się wodą z sąsiadującymi roślinami. Głęboko korzeniące się gatunki mogą być komplementarne w stosunku do płycej korzeniących się roślin uprawnych. Korzenie innych gatunków drzew (np. szybko rosnących) rozrastają się przy powierzchni, konkurując z sąsiadami. Są też drzewa, które są w stanie wytworzyć „hydrauliczną dźwignię” (ang. *hydraulic lift*) (więcej informacji na ten temat w osobnej części). Generalnie procesy redystrybucji wody z udziałem roślin są słabo poznane.
7. Pomimo znaczącej zdolności retencyjnej i transpirującej drzew wysoka porowatość gleby, zwłaszcza na glebach lekkich, przyspiesza ruch infiltracji, skracając czas zasilania wód powierzchniowych, co może zwiększyć przepływ w ciekach zlewni. Niski poziom wód gruntowych stymuluje korzenie do wzrostu w głąb gleby w poszukiwaniu wody, potencjalnie ograniczając negatywny wpływ na rośliny współrzędne w warstwie powierzchniowej gruntu.
8. Udział wody zatrzymanej przez korzenie drzew zależy od charakterystyki opadu. Wielkość spływu powierzchniowego jest funkcją czasu i intensywności opadu atmosferycznego oraz stanem wyjściowym uwilgotnienia (nasycenia wodą) gleby.
9. Im mniejszy stopień pokrycia gruntu drzewami, tym większa szorstkość powierzchni czynnej. Wzrost turbulencji w powietrzu napływającym do roślinności zwiększa straty wody w wyniku ewapotranspiracji.

10. Dynamika obiegu wody zależy silnie od faz rozwojowych i wieku roślin oraz ich struktury gatunkowej w zbiorowisku roślinnym, ponieważ decyduje o wykształceniu się systemu korzeniowego i układu części nadziemnej. Ważne znaczenie ma komplementarność gatunków drzew o odmiennym typie systemu korzeniowego zwiększająca przewodnictwo hydrauliczne gleby.

Dopasowanie odpowiednich drzew do warunków lokalnych oraz wybór optymalnej więzby mieszkanki gatunków (zarówno drzew głęboko, jak i płytko się korzeniących) wymaga wiedzy i zrozumienia danego siedliska, wykraczających poza to, co mogą zapewnić ogólne bazy danych (60).

Zjawisko „dźwigni hydraulicznej”

Pobieranie wody przez korzenie roślin jest spowodowane różnicą potencjału wody między glebą a atmosferą w warunkach otwarcia aparatów szparkowych rośliny. Proces zależy głównie od zdolności eksploracji gleby przez korzenie i jest związany z ich gęstością i powierzchnią. Rośliny o głębokich korzeniach są w stanie podnosić lub redystrybuować wodę do górnych warstw gleby poprzez proces znany jako „dźwignia hydrauliczna”, będąc potencjalnymi biosystemami nawodnieniowymi dla sąsiednich roślin (rys. 9). W nocy, gdy aparaty szparkowe są zamknięte, a woda jest nadal transportowana przez korzeń palowy do liści, potencjał wodny rośliny wzrasta stopniowo powyżej potencjału wysychającej gleby. Wyrównując różnicę potencjałów, woda przepływa z korzeni do gleby, zwiększając jej wilgotność. Ten proces może poprawiać stan nawodnienia roślin, np. poprzez zwiększanie transpiracji, oraz zwiększać przeżywalność i wzrost roślin uprawianych współrzędnie, konkurujących z drzewami o wodę (14, 37). Zjawisko to może dotyczyć zarówno korzeni drzew o dimorficznym (palowo-wiązkowym) systemie korzeniowym, jak również traw, roślin bobowatych lub żyta czy owsa, które posiadają głębsze korzenie niż drzewa w początkowej fazie wzrostu, co jest szczególnie korzystne w warunkach suszy glebowej. Występowanie zjawiska „dźwigni” jest skorelowane z gęstością gleby (52), podczas gdy gleby lekkie, piaszczyste przeciwdziałają redystrybucji wody przez korzenie, prawdopodobnie ze względu na mniejszy kontakt korzeni z glebą (66). Przycinanie korzeni lub koron drzew stymuluje proces „dźwigni” (6). Zjawisko może być korzystne w przypadku gleb ubogich w składniki pokarmowe lub podczas fitoremediacji na skażonych gruntach, wspomagając proces pobierania związków przez rośliny korzystające z polepszonych warunków wodnych w glebie (37). Z działaniem „dźwigni hydraulicznej” korzeni wiążą się również możliwe zagrożenia, takie jak przyspieszone wyczerpywanie się wody i zasobów pokarmowych powodujące wzmożoną konkurencję o wodę (6) lub nagromadzenie uniesionych zanieczyszczeń w powierzchniowej warstwie gleby (37). Redystrybucja wody glebowej może mieć znaczący wpływ na przebieg cykli hydrologicznych w regionie (22).



Rys. 9. Zjawisko „dźwigni hydraulicznej” oznacza proces pasywnego przemieszczania się wody z korzeni do gleby o niższym potencjale wodnym, podczas gdy inne części systemu korzeniowego rośliny w wilgotniejszych warstwach gleby pochłaniają wodę. W nocy, gdy transpiracja ustaje, woda jest uwalniana z korzeni, np. do górnych warstw gleby i wchłaniana przez korzenie roślin następnego dnia

Źródło: Liste i White, 2008 (37)

Wpływ zadrzewień śródpolnych na mikroklimat

Jak zostało wspomniane wcześniej, występowanie zadrzewień śródpolnych zakłóca ruch powietrza, powodując tworzenie się wirów o różnym charakterze, początkowo przechwytyjących parę wodną, a następnie, jeśli warunki na to pozwalają, mieszających przypowierzchniowe warstwy powietrza, co w efekcie ogranicza wymianę gazów pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą.

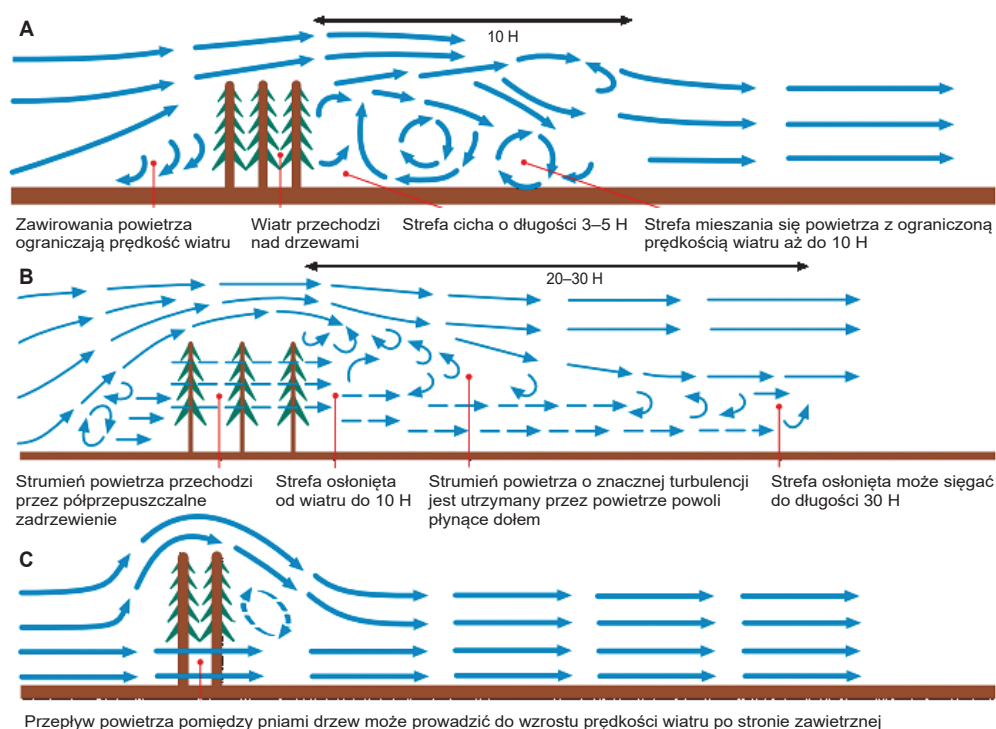
Najważniejszymi czynnikami kontrolującymi ograniczenie prędkości wiatru są wysokość zadrzewienia oraz jego porowatość (przepuszczalność), czyli stosunek wolnej przestrzeni w porównaniu z przestrzenią zajęta przez pnie, gałęzie i liście. Alternatywnie dla uproszczenia stosuje się wskaźnik porowatości optycznej, czyli procentowy udział otwartych przestrzeni w zadrzewieniu, widziany prostopadłe do pasa.

Im luźniej rozmieszczone są wobec siebie drzewa lub pomiędzy liśćmi, koronami i pniami drzew występuje więcej wolnych przestrzeni, tym większa szorstkość przeszkody, co powoduje większe zawirowania, ale na stosunkowo krótkim odcinku, po czym strumień powietrza powraca do pierwotnej struktury swojego przebiegu (rys. 10C). W takich warunkach dochodzi do przyspieszenia prędkości wiatru po

stronie zawietrznej przeszkody, co może powodować wyleganie roślin i zranienia tkanek w wyniku uderzania o nie cząsteczek gleby (24).

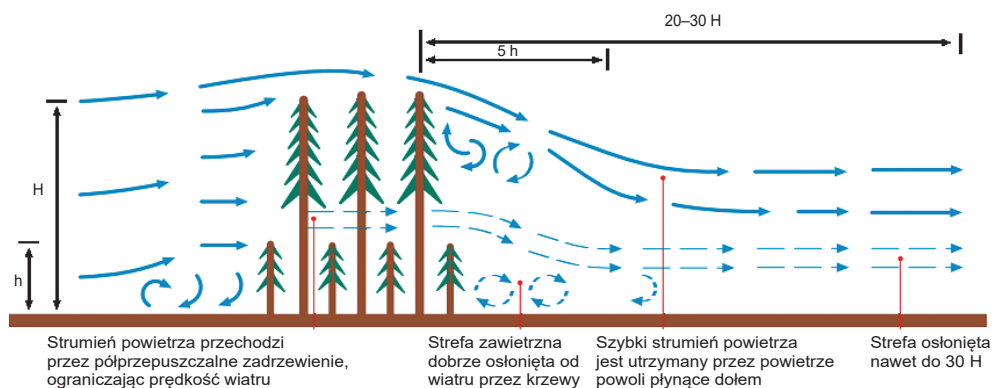
Zwarte przeszkody zwiększają zawirowania po stronie dowietrznej i zawietrznej zadrzewienia, tworząc kolejno obszary wysokiego i niskiego ciśnienia (rys. 10 A). Wysokie ciśnienie powietrza wymusza silny przepływ powietrza nad przeszkodą, tworzy strefę cichą (prędkość wiatru bliska zeru) tuż przy zadrzewieniu, następnie w warunkach niskiego ciśnienia powoli miesza się mniej więcej do wysokości $1,5 H$ zadrzewienia. Strefa mieszania obniża się stopniowo, aż do uzyskania odległości 10 wielokrotności zadrzewienia. Podobnie stopniowo prędkość wiatru przybiera na sile, ale jest wciąż mniejsza niż po stronie dowietrznej (24).

Modelowy przepływ strumieni powietrza przy różnych strukturach porowatości zadrzewienia pasowego przedstawiono na rysunkach 10 i 11.



Rys. 10. Modele przepływu strumienia powietrza przez: A – pas zadrzewienia o silnym zwarcu (0–40% porowatości); B – pas zadrzewienia o średnio przewiewnym/półprzepuszczalnym zwarcu (40–50% porowatości); C – pas zadrzewienia o luźnym zwarcu (60–100% porowatości)

Źródło: Gardiner i in., 2006 (24)



Rys. 11. Model przepływu strumienia powietrza przez pas o strukturze hybrydowej (łączącej strukturę półprzepuszczalną piętra wysokiego o 40–60% porowatości oraz strukturę zwartą niskiego piętra krzewów o porowatości <40%)

Źródło: Gardiner i in., 2006 (24)

W przypadku zadrzewienia o średnioprzewijnym zwarciu (rys. 10 B) strumień powietrza nie rozdziela się tak jak w przypadku zwanego pasa, lecz przechodzi stosunkowo łagodnie przez korony i pnie, zwiększając w ten sposób zasięg oddziaływania wiatrochronnego, chociaż kosztem mniejszego ograniczenia prędkości wiatru. Zadrzewienie typu hybrydowego, przedstawione na rysunku 11, może pozwolić na zachowanie zasięgu działania, ale obniżenie prędkości wiatru będzie mniejsze jak dla zadrzewienia w pełni półprzepuszczalnego. Dodatkowo w takim modelu zadrzewienia może dojść do utworzenia trójkątnego kształtu jego profilu, w przypadku gdy drzewa lub krzewy niższego piętra zasadzone na jego brzegach osiągną odpowiednią wysokość. Takiej formy należy unikać, gdyż ułatwia przeslizgiwanie się powietrza nad zadrzewieniem, skraca zasięg przeciwwietrznego oddziaływania drzew, a nawet może zwiększyć ryzyko zawirowań oraz prędkość wiatru po stronie zawietrznej.

Wielu badaczy zgadza się, że wysokość zadrzewienia i prędkość wiatru na otwartej przestrzeni są głównymi czynnikami wpływającymi na zasięg wiatrochronnego oddziaływania, podczas gdy porowatość zadrzewienia jest krytycznym czynnikiem określającym wielkość redukcji prędkości wiatru. Największa efektywność osłony przed wiatrem występuje w przypadku drzew dojrzałych o rozwiniętej strukturze koron (od 20 do 40 lat dla większości gatunków rodzimych i kilkanaście lat w przypadku topól). Pas składający się z drzew młodych (z wyjątkiem niektórych drzew iglastych) posiada na ogół strukturę o luźnym zwarcu. Wysokość zadrzewień pasowych dla większości dojrzałych gatunków zawiera się w zakresie 15–22 m. Utrzymanie właściwej struktury (głównie porowatości) i kształtu zadrzewienia wymaga prowadzenia prac pielęgnacyjnych – przerzedzania drzew, przycinania gałęzi, w razie potrzeby dosadzania nowych. Przeciwwietrzna rola zadrzewień ma również istotne znaczenie

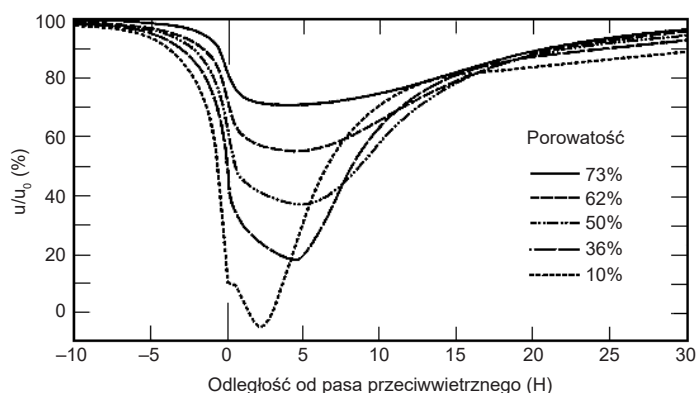
dla hamowania wiatrów zimowych, wywiewających śnieg z pól. W tym przypadku najbardziej skuteczna jest osłona z porowatością 25–40%. Nieregularne opady śniegu narażają coraz częściej uprawy ozime i glebę na przemarzanie. Dodatkowo osłona przed wiatrami zapobiega zwiewaniu śniegu do lokalnych obniżeń, skąd podczas wiosennych roztopów większość wody ulega wyparowaniu.

Zadrzewienia pasowe spełniają nie tylko funkcje przeciwwietrzne, ale również chroniące przed erozją wietrzną oraz wodną, biocenotyczne, przeciwnieźne wzdłuż szlaków komunikacyjnych, przeciwdziałające skutkom niskich temperatur, ograniczające zanieczyszczenie powietrza. Każda z tych funkcji wymaga innego sposobu projektowania, więc nie będzie komplementarna z optymalną formą i budową zadrzewień przeciwwietrznych. Szczegóły projektowania zadrzewień można znaleźć w książce Zajackowskich (67).

Analizując dane efektywności przeciwwietrznej w zakresie optymalnej porowatości (*vide* cytowana powyżej wartość 40–50%, dla warunków Wielkiej Brytanii), można natknąć się na pewne rozbieżności, które częściowo wynikają z różnej interpretacji wskaźnika porowatości. Badania symulacyjne prowadzone w tunelu aerodynamicznym przez Cornelisa i Gabrielsa (19) wykazały, że porowatość w zakresie 20–35% była najbardziej optymalna dla redukcji prędkości wiatru. Podobne wnioski przedstawiają w swojej pracy przeglądowej Wu i in. (64) dla jednorzędowych zadrzewień, rekomendując 20–30% porowatość optyczną jako optymalną w tym przypadku. Wang i Tackle (61) twierdzą, że rzędy drzew o niskiej porowatości są jedynie nieznacznie mniej skuteczne pod względem zasięgu oddziaływania niż rzędy o średniej porowatości (zakres pomiarów porowatości 10–50%). Zbliżone opinie można znaleźć również w innych opracowaniach (8, 17). Pasy wiatrochronne o gęstej strukturze, z dużą siłą oporu, mogą pochłaniać więcej energii i przepuszczać mniej wiatru niż pasy o zwarcu rzadkim, co skutkuje niższą minimalną prędkością wiatru i większą odległością zasięgu oddziaływania pasa (64), chociaż powodują większe zawirowania powietrza (19, 46, 61).

Często podaje się w literaturze, że spadek redukcji prędkości wiatru w funkcji odległości od zadrzewienia następuje logarytmicznie dla danej wartości porowatości zadrzewienia po przekroczeniu pewnej granicznej wartości odległości, która oznacza najwyższą redukcję prędkości i jest stopniowo niższa dla rosnących przepuszczalności, a jej dalszy spadek jest łagodniejszy (rys. 12).

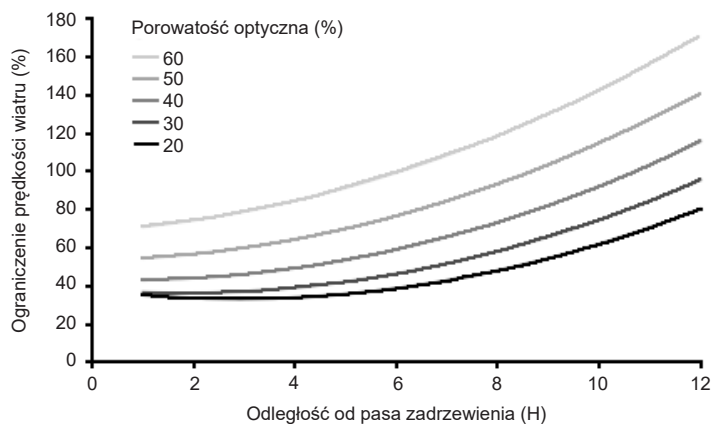
Wang i Takle (61) szacują, że redukcja prędkości wiatru jest największa w przypadku porowatości zadrzewienia 10% dla pierwszych kilku metrów odległości (3 H), po czym osłabia się trochę szybciej niż dla wyższych badanych porowatości, by w efekcie utrzymać nieco silniejszą redukcję dla dalszych odległości (15–30 H) (rys. 12).



Rys. 12. Przestrzenna zmienność średniej poziomej prędkości wiatru na wysokości mniejszej niż 0,5 H dla pasów waitrochronnych o różnej porowatości

Źródło: Wang i Takle, 1997 (61)

W badaniach prowadzonych w Czechach (rys. 13) stwierdzono, że wartości porowatości optycznej poniżej 20% są optymalne pod względem redukcji prędkości wiatru. Nie stwierdzono wyraźnego zmniejszenia prędkości wiatru dla wartości 53% w odległości 9 H po stronie zawietrznej (49).



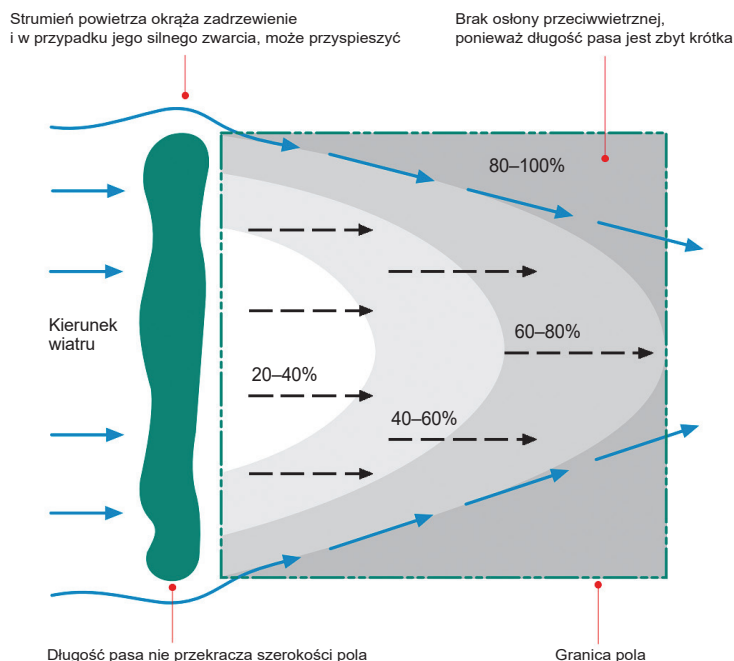
Rys. 13. Ograniczenie prędkości wiatru w funkcji porowatości optycznej zadrzewienia i odległości od niego

Źródło: Řeháček i in., 2017 (49)

Podobnie rozbieżne opinie można spotkać na temat wpływu szerokości pasa na redukcję prędkości wiatru i jej zasięg w odległości od zadrzewienia. Gardiner i in. (24) cytują badania, które podają, że zadrzewienia o szerokości większej niż dwukrotna wysokość drzew nie działają lepiej pod względem osłony przeciwwietrznej niż węższe zadrzewienia. Ich działanie przypomina bardziej wpływ zwartej przeszkody,

gdzie ruch powietrza przyspiesza, a po jej przekroczeniu stosunkowo szybko zwalnia w porównaniu z przeszkodą półprzepuszczalną. Z drugiej strony szeroka przestrzeń zadrzewienia pozwala na rozwinięcie się turbulencji, co powoduje przyspieszenie wiatru po stronie zawietrznej tak jak w przypadku luźnych zadrzewień i może negatywnie oddziaływać na rośliny uprawne. Z kolei Cornelis i in. (19) podają, że bariery dwu- i trzyczędrowe były najbardziej skuteczne pod względem redukcji prędkości wiatru w zakresie od 3 do 8 H, ale przy większych odległościach bariery jednorzędowe powodowały większą redukcję prędkości wiatru. Inne badania wskazują na największą przeciwwietrzną efektywność dojrzałych drzew, posadzonych w 5–7 rzędach, przy ich odstępie w zakresie 1,5–2,0 m oraz odległości pomiędzy drzewami w rzędzie 0,7–1,5 m w zależności od gatunku (13, 28, 47, 59).

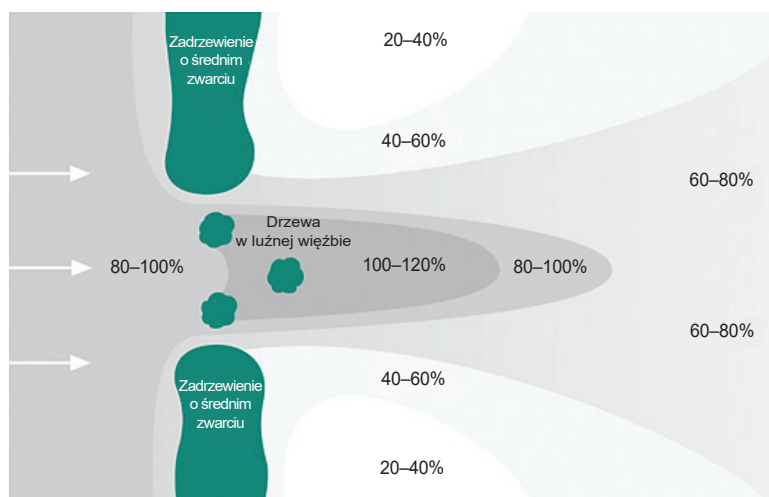
Ekspertcy są generalnie zgodni, jeśli chodzi o wpływ długości pasa na zasięg osłony wiatrochronnej. Im dłuższy pas, tym większa powierzchnia gruntu rolnego może korzystać z ochrony przed parowaniem. Ogólna zasada mówi, że długość pasa powinna być większa niż 10 wysokości zadrzewienia. Najlepiej, gdy długość pasa przekracza długość pola do niego przyległego. Wynika to z faktu, że wiatr przyspiesza na granicy przeszkody, wnikać pod pewnym kątem na niechroniony grunt. Obszar oddziaływania zadrzewienia ma więc kształt zbliżony do trójkąta, jak pokazano na rysunku 14.



Rys. 14. Wpływ długości pasa przeciwwietrzego na powierzchnię gruntu, na której można zaobserwować wiatrochronne oddziaływanie zadrzewienia. Wartości procentowe pokazują oczekiwaną redukcję prędkości wiatru w idealnych warunkach w stosunku do wartości na otwartym obszarze

Źródło: Gardiner i in., 2006 (24)

W podobnie negatywny sposób jak brzeg pasa działają wszelkie przerwy w pasie. Bardzo ważne jest, aby ich uniknąć poprzez dosadzanie nowych drzew. Jeśli jest konieczne stworzenie przejazdu, przejścia lub przepędu zwierząt, należy to wykonać, sadząc drzewa w sposób pokazany na rysunku 15, minimalizując odbicie strumienia powietrza i blokując w ten sposób przepływ powietrza. W tym celu stosuje się również specjalne ogrodzenia, nasadza żywopłoty lub po prostu dostawia bele słomy.



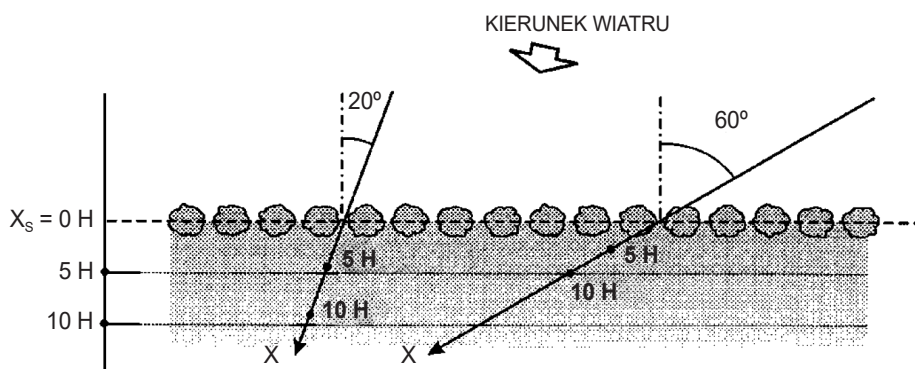
Rys. 15. Zalecany sposób osłony wiatrochronnej w przypadku luki w zadrzewieniu lub potrzeby dostępu do pola. Wartości procentowe pokazują oczekiwaną redukcję prędkości wiatru w idealnych warunkach w stosunku do wartości na otwartym obszarze

Źródło: Gardiner i in., 2006 (24)

Wielu naukowców wskazuje na fakt, że najlepszym wskaźnikiem oceny wiatrochronności pasów zadrzewieniowych jest wykorzystanie indeksów biorących pod uwagę ich strukturę poziomą, pionową i różnorodność gatunkową (32, 44), często lepiej opisujących redukcję prędkości wiatru niż parametry porowatości czy wymiarów pasa (59). Porowatość optyczna jest wskaźnikiem bardziej użytecznym dla wąskich/ jednorzędowych pasów, podczas gdy indeksy opisujące trójwymiarową strukturę zadrzewienia powinny być wykorzystywane dla szerszych pasów. Pasy złożone z gatunków liściastych i iglastych działają zwykle lepiej pod względem średniej redukcji wiatru po stronie zawietrznej niż pasy drzew liściastych.

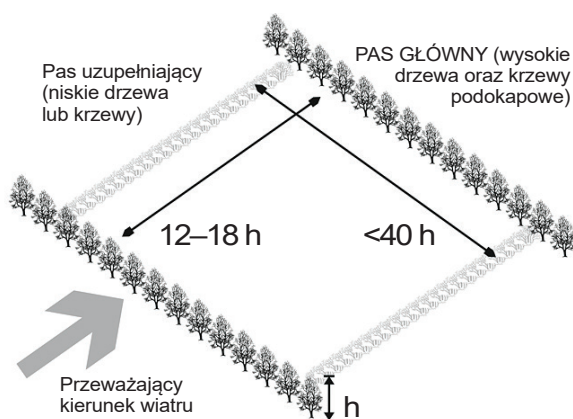
Pas zadrzewienia w największym stopniu ogranicza prędkość wiatrów, jeśli jest zlokalizowany prostopadłe do dominującego kierunku wiatru (rys. 16). W warunkach Polski jest to kierunek zbliżony do zachodniego, co ułatwia planowanie zadrzewień w krajobrazie rolniczym, zwłaszcza że ich orientacja na linii północ-południe będzie w maksymalnym stopniu ograniczać zacienienie. Biorąc jednak pod uwagę częstą zmienność kierunku wiatrów, najbardziej efektywne dla ochrony wiatrochronnej będzie dosadzenie uzupełniającego pasa niskich drzew i krzewów, aby ograniczyć

ich wpływ na produkcję rolniczą (rys. 17). Zaleca się, aby odległość pasów przeciwwietrznych wynosiła od 12 do 18 wielokrotności docelowej zadrzewienia, co zależy od pojemności wodnej gleb oraz lokalnych uwarunkowań klimatyczno-opadowych (67). Biorąc pod uwagę pogarszające się warunki klimatyczne dla produkcji rolniczej w związku ze zmianą klimatu, bardziej korzystne może być zawężenie odległości między pasami do minimalnie zalecanej 12 H. Powtarzające się po sobie pasy przeciwwietrzne zwiększają turbulencje w sąsiedztwie zadrzewienia, skracając strefę cichą, ale jednocześnie powodują zwiększenie tarcia strumienia powietrza po stronie dowietrznej, ograniczając prędkość wiatru, co kompensuje z nadwyżką osłabienie ochrony w systemie zadrzewień (33).



Rys. 16. Zmiana kierunku wiatru znacząco wpływa na powierzchnię gruntu, na której można zaobserwować wiatrochronne oddziaływanie zadrzewienia. Im ostrzejszy kąt natarcia strumienia powietrza na powierzchnię zadrzewienia, tym mniejszy zasięg oddziaływania na powierzchnię gruntu

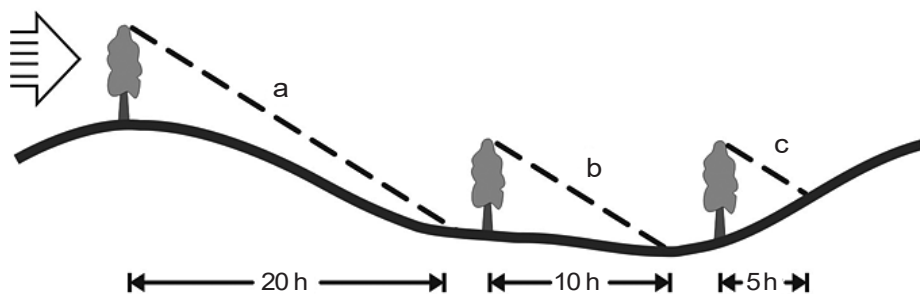
Źródło: Cleugh, 1998 (18)



Rys. 17. Z powodu zmienności kierunku wiatrów główne pasy zadrzewieniowe powinny być uzupełnione prostopadłymi do nich pasami wspomagającymi, aby zapobiegać przyspieszaniu powietrza wzdłuż pasa

Źródło: Zajączkowski i Zajączkowski, 2013 (67)

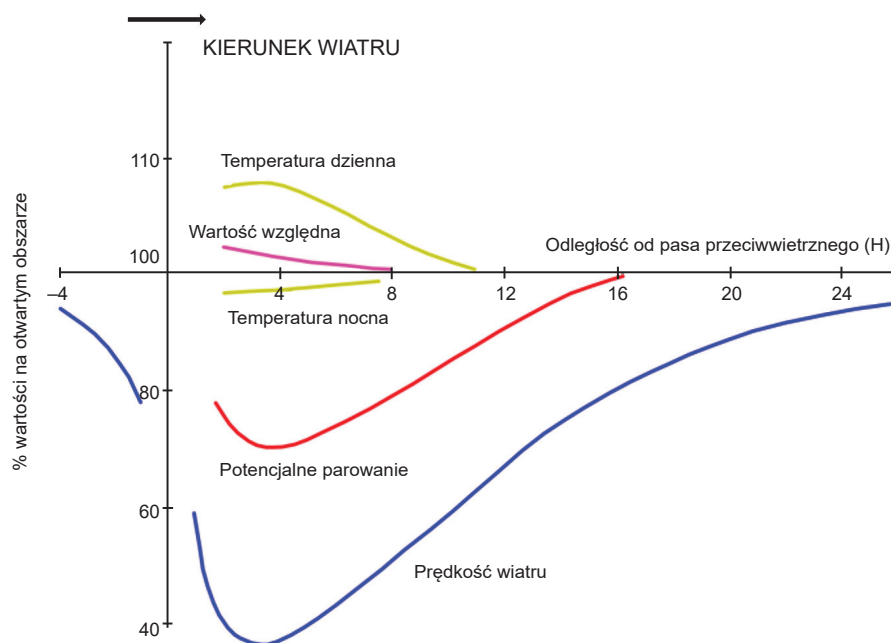
Ukształtowanie terenu jest kluczowym czynnikiem efektywności przeciwwietrznego zadrzewienia. Najbardziej skuteczna jest lokalizacja pasów wiatrochronnych na obszarze płaskiego terenu. Jeśli jest to niewykonalne, należy wybierać takie miejsca, które pozwolą na przechwycenie energii strumienia powietrza najwcześniej jak to jest możliwe. Najlepsza pozycja znajduje się zawsze na szczytach wzniesień (rys. 18).



Rys. 18. W terenach urzeźbionych zasięg wiatrochronnego oddziaływania zadrzewień będzie zależeć od ich odpowiedniej lokalizacji: znacznie większy jest dla drzew umieszczonych na szczycie zbocza (a) niż dla tych w dolinach (b) oraz na stokach (c). W przypadku stromych wzgórz pas wiatrochronny na szczycie może zwiększyć turbulencje. Sadzenie konturowe na zboczach przechwytuje przepływ zimnego powietrza w dół i może zwiększyć ryzyko przymrozków. Na terenach podatnych na mróz oraz w zagłębieniach zadrzewienia powinny mieć więcej luk i mniejszą porowatość, aby przyspieszać strumień powietrza

Źródło: Kujawa i in., 2018 (36)

Oprócz prędkości wiatru śródpolny pas zadrzewienia ma również wpływ na inne parametry meteorologiczne. Idealny model takiego oddziaływania przedstawiono na rysunku 19. Największy wpływ na temperaturę jest w zasięgu $8 H$ zadrzewienia. W dalszej odległości temperatura dzienna zwykle się obniża, a nocna przy gruncie podwyższa, chyba że wystąpi inwersja temperatury wywołująca przymrozek. Z drugiej strony zadrzewienie chroni przed nagłym adwekcyjnym przymrozkiem związanym z poziomym ruchem zimnego powietrza. Niższe temperatury nocne mogą osłabiać proces oddychania roślin, zwiększając w ten sposób ilość węgla potrzebnego do fotosyntezy i wzrostu rośliny (rośliny zwykle są wyższe i mają większe liście, podobnie jak w przypadku ich zacienienia). Jednak wyższe rośliny mają większe zapotrzebowanie na wodę – w warunkach wysokiej temperatury i ograniczonej dostępności wody w glebie będą odczuwać większy stres. Ostatecznie wpływ zadrzewienia na stan roślin zależy głównie od ich gatunku, fazy rozwoju oraz warunków glebowo-klimatycznych. Dowiedziono również, że pasy zadrzewień zwiększają częstość występowania zjawiska rosy, przyczyniając się do lokalnego wzrostu sumy opadów (4).



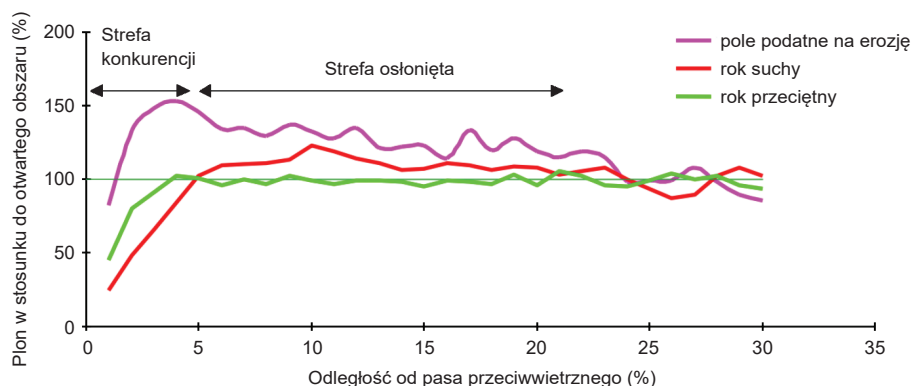
Rys. 19. Zmiany mikroklimatycznych parametrów na różnych odcinkach oddziaływania idealnego pasowego zadrzewienia śródpolnego o optymalnej strukturze.

Po stronie dowietrznej prędkość wiatru znacząco spada (w odległości ok. 4 wysokości zadrzewienia), po przejściu na drugą stronę zadrzewienia obserwujemy jeszcze większy spadek prędkości, po czym zaczyna ona powoli rosnąć, aż do wyrównania się z nie zaburzonym profilem wiatru w odległości 20–30 wysokości zadrzewienia. W obrębie zadrzewienia (nie określono na rysunku) mamy do czynienia z bezpośrednim jego oddziaływaniem na bilans ciepła – osłona drzew obniża temperaturę przygrunтовую w ciągu dnia, natomiast zwiększa w ciągu nocy. Po stronie zawietrznej początkowo występuje nieznaczny wzrost temperatury dziennej w stosunku do powierzchni nieosłoniętej oraz adekwatnie spadek temperatury nocnej i wzrost wilgotności względnej, z tym że oddziaływanie osłony na te dwa ostatnie parametry występuje na nieco krótszym odcinku. W miarę wzrostu odległości od zadrzewienia spada też wartość potencjalnego parowania, co można zauważyć aż do długości 6 wysokości drzew. W zakresie od 8 do 24 H turbulencje w ciągu dnia wzrastają, a temperatury powietrza mogą być o kilka stopni niższe niż w obszarach nieosłoniętych (nie określono na rysunku) (43). Temperatury nocne do 1 m wysokości są na ogół o 1–2°C cieplejsze w strefie chronionej, która może sięgać aż do 30 H, niż w obszarach odsłoniętych. Z kolei temperatury od 1 do 2 m nad powierzchnią są zwykle nieco niższe. Podczas bardzo cichych nocy mogą wystąpić inwersje temperatury, a obszary chronione mogą być o kilka stopni chłodniejsze niż obszary odsłonięte (2). Przyjmuje się, że wiatrochronne oddziaływanie pasa na plon roślin utrzymuje się do odległości 12–18 H. Rzeczywiste zmiany temperatury i wilgotności zależą od typu pokrycia gruntu, właściwości gleby, pory roku, ukształtowania terenu i zmienności warunków klimatycznych.

Źródło: Marshall, 1967 (41)

W efekcie oddziaływania półprzepuszczalnych pasów przeciwwietrznych następuje wzrost plonowania roślin uprawnych znajdujących się w strefie oddziaływania zadrzewień. Poprawa plonowania jest obserwowana w szczególności w przypadku warzyw, ziemniaka, buraka cukrowego, roślin specjalnych (5), sadow i winnic (45) oraz cieniulubnych roślin wieloletnich – traw i bobowatych, np. koniczyny (11). Korzystniejsze warunki mikroklimatyczne mogą również wydłużyć okres uprawy roślin polowych. Wzrost wilgotności oraz temperatury w warstwie powietrza znajdującej się pod wpływem zadrzewienia pozwala na otwarcie aparatu szparkowego i zwiększenie wymiany gazowej rośliny, przyspieszając proces fotosyntezy i wzrost roślin, w szczególności przez zwiększenie powierzchni liści. Faza generatywna rozwoju może być opóźniona. Należy jednak pamiętać, że końcowy plon rośliny jest wypadkową wielu różnych czynników oddziałujących w okresie całego jej rozwoju.

Wiele badań pokazuje, że wiatrochronne zadrzewienia zmniejszają plony w latach o średnich lub ponadprzeciętnych opadach deszczu, ale zwiększają je w suchych, wietrznych warunkach (57) (rys. 20). Wprowadzanie przeciwwietrznych zadrzewień śródpolnych jest więc dobrą formą ubezpieczenia upraw przed niekorzystnymi i trudnymi warunkami środowiskowymi (57) i może chronić przed niekorzystnymi skutkami zmian klimatycznych.



Rys. 20. Plon roślin uprawnych w Australii (wyniki z 64 lat polowych w Australii Zachodniej) w funkcji odległości od pasa przeciwwietrznego dla różnych lat o odmiennych uwarunkowaniach meteorologicznych. W latach suchych efekt ochronny zadrzewień jest bardziej korzystny dla plonowania roślin uprawnych, z wyjątkiem lat bardzo suchych, kiedy deficyt wody w glebie jest przeważającym czynnikiem ograniczającym wzrost i rozwój roślin

Źródło: Sudmeyer i in., 2007 (56)

Bilans wodny w alejowych systemach rolno-leśnych

Wpływ alejowych systemów rolno-leśnych na bilans wodny nie jest tak dobrze rozpoznany jak pasów wiatrochronnych, nad którymi badania rozpoczęto ponad sto lat temu. Pierwsze badania nad dostosowaniem zadrzewień do formy alejowej rozpoczęły się w latach siedemdziesiątych XX wieku. Głównym celem systemów alejowych jest alternatywna produkcja rolnicza, w związku z czym układ drzew, struktura koron i korzeni mogą znacząco różnić się pomiędzy różnymi systemami, jak i w ramach tego samego nasadzenia drzew, jeśli stosuje się różne gatunki. W efekcie wyniki badań nad oddziaływaniem systemów alejowych na mikroklimat pola i bilans wodny nie są ze sobą spójne.

Jednymi z najbardziej poznanych systemów alejowych pod kątem bilansu wodnego są współrządne uprawy drzew krótkiej rotacji – zwłaszcza wierzby i topoli. Drzewa te sadi się w bardzo gęstej więźbie ($10\,000\text{--}40\,000$ sadzonek $\cdot\text{ha}^{-1}$) w formie kilkurzędowego pasa, zwykle w cyklu 3–6-letnim, aby ułatwić zmechanizowany zbiór biomasy z przeznaczeniem na zrębki energetyczne. Regularność i zwartość zadrzewienia nadaje mu cechy zbliżone do pasa wiatrochronnego. Pomimo relatywnie krótkich odstępów pomiędzy pasami struktura przepływu powietrza nie odbiega znacząco od pola z zadrzewieniami przeciwwietrznymi, ponieważ wysokość drzew nie przekracza zwykle 5 metrów (3–8 metrów).

Kanzler i in. (34) uważają, że taka pozioma struktura zadrzewień powoduje prawdopodobnie powstawanie w kolejnych międzyrzędziach (alejach) stref cichych, na co wskazywałyby przeprowadzone pomiary prędkości wiatru, chociaż przepływ strumieni powietrza będzie zależał od lokalnych uwarunkowań. Ponadto powtarzające się po sobie w odpowiednio bliskiej odległości równoległe pasy zwiększają efekt przeciwwietrzny systemu. Przez większość badanego okresu autorzy stwierdzili wpływ pasów topoli i robinii na redukcję prędkości wiatru w uprawach międzyrzędowych w porównaniu z otwartym polem. Średnie plony pszenicy dla analizowanego międzyrzędzia były o 16% większe niż na nieosłoniętym polu, plony ziarna zwiększały się (zakres 1–30%) wraz ze wzrastającą odległością od pasa, chociaż w centralnej części międzyrzędzi zaobserwowano spadek wielkości biomasy ziarna. Odnotowano również wzrost temperatury i wilgotności w czasie dnia oraz spadek temperatury nocą w łanie roślin, chociaż dotyczyły one pierwszych kilku metrów odległości od drzew (do 3 i do 9 m w zależności od wystawy na wiatr). Przez okres 4 dni, które były reprezentatywne dla warunków pogodowych w eksperymencie, średnia redukcja parowania we wszystkich pomiarach wyniosła ponad 27%. We wcześniejszych badaniach na obiektach Böhm i in. (10) dowiedli, że redukcja prędkości wiatru w międzyrzędziach zależała od wysokości drzew oraz szerokości i orientacji rzędów drzew. Według tych badaczy szerokość alei znacznie przekraczająca 50 m nie daje skutecznej ochrony przed parowaniem, co wynika z działania zwartych zadrzewień o relatywnie niskiej wysokości na przepływ powietrza. Jednak zbiór drzew w krótkiej rotacji wiąże się z tymczasową utratą funkcji przeciwwietrznej. Z tego powodu zaleca się częściowy zbiór biomasy z rzędów po jednej stronie pasa lub najlepiej wycina-

nie co drugiego rzędu. Ponieważ topola i robinia są gatunkami szybko rosnącymi, poprzednia funkcja przeciwwietrzna całości pasa może zostać przywrócona już po kilku miesiącach wzrostu roślin.

Markwitz i in. (39), wykorzystując metodę kowariancji wirów, stwierdzili, że na polach z pasami wierzby i topoli nie zwiększyła się znacząco ewapotranspiracja w porównaniu z kontrolnymi uprawami monokulturowymi (łąka lub grunt orny). Pomimo wzrostu szorstkości powierzchni w obrębie upraw drzew zwiększającej turbulencje powietrza transpiracja była w dużym stopniu kontrolowana przez aparat szparkowy roślin. Różnice pomiędzy średnimi wartościami oporu szparkowego roślin w obu systemach były stosunkowo nieduże. Niższa ewapotranspiracja w strefie cichej kompensowała wzrost ewapotranspiracji w strefie mieszania, w efekcie w skali systemu alejowego wartości ewapotranspiracji były porównywalne z wartościami w systemie monokulturowym. W innym badaniu Martkewitza i in. (40) w czterech z pięciu stanowisk badawczych roczna skumulowana ewapotranspiracja okazała się wyższa na poletkach z systemem alejowym niż w monokulturze. Autorzy interpretują wyniki wzrostem całkowitej wielkości biomasy zarówno drzew, jak i roślin uprawianych w międzyrzędziach w porównaniu z monokulturowym polem, zwracają też uwagę na wpływ zawirowań powietrza na obszarze zadrzewienia, co zwiększa parowanie wody.

Drzewa uprawiane w systemach alejowych w silnej więźbie (tak jak w przypadku drzew krótkiej rotacji) poprawiają bilans wodny pola z reguły na zasadzie spełniania funkcji przeciwwietrznych. W warunkach suszy, szczególnie na glebach lekkich, drzewa są zmuszone do wydłużania systemu korzeniowego w głąb gleby, aby ograniczyć konkurencję o wodę z innymi drzewami. Drzewa nasadzone w luźniejszych odstępach od siebie (np. drzewa owocowe lub z przeznaczeniem na drewno wysokiej jakości) są o wiele mniej efektywne w poprawie mikroklimatu, ale w wyniku mniejszej szerokości międzyrzędzi mogą mieć bardziej wyraźny wpływ na obniżenie temperatury dziennej w łanie roślin uprawnych, ograniczenie spływu powierzchniowego i wzrost wilgotności gleby (31).

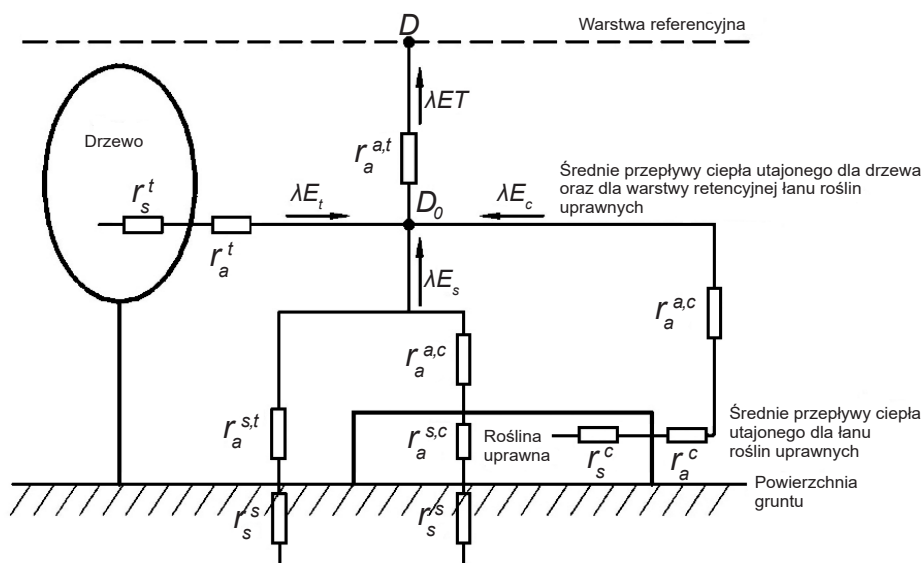
Wyniki wielu badań nad systemami alejowymi są zgodne co do kwestii pozytywnego wpływu drzew na rośliny uprawne w warunkach suszy, niewiele z nich jest jednak w stanie udowodnić ten aspekt szeregiem danych czasowych. Wynika to ze skomplikowanych relacji pomiędzy roślinami ponad gruntem, jak też w glebie. Zgodnie z hipotezą gradientu stresu, w bardziej stresujących warunkach równowaga netto między konkurencją i synergia w zbiorowiskach roślinnych przesuwają się w kierunku bardziej korzystnych interakcji (7). Jednak przekroczenie pewnego poziomu krytycznego prowadzi do nieodwracalnych zmian zaburzających zrównoważoną strukturę roślinności. Istotne znaczenie ma określenie, kiedy występują krytyczne okresy wzrostu i rozwoju roślin oraz w jakim stopniu są one wtedy podatne na różne czynniki stresowe. Na przykład zacienienie w fazie kwitnienia ogranicza liczbę i masę ziarna zbóż, ale ogólnie może mieć korzystne oddziaływanie na plonowanie zielonej biomasy traw lub roślin bobowatych poprzez regulację stosunków wodno-powietrznych (54) lub adaptację roślin do pogorszonych warunków świetlnych (3, 65).

Z drugiej strony czas występowania suszy ma znaczący wpływ na alokację biomasy między organami wegetatywnymi i generatywnymi. Badania Day i in. (20) oraz Martina i Jamiesona (42) wskazują, że w warunkach wczesnej wiosennej suszy plon nasion grochu siewnego i ziarna jęczmienia ulega poprawie ze względu na ograniczony rozwój wegetatywny i jednocześnie utrzymany lub czasami poprawiony rozwój reprodukcyjny, podczas gdy późne susze mają szkodliwy wpływ na rozwój rośliny. Zacienienie roślin, które stosunkowo dobrze je tolerują, może mieć wtedy działanie pozytywne, ponieważ równoważy negatywny wpływ suszy na rozwój wegetatywny rośliny. We francuskim eksperymencie ze sztuczną regulacją opadów, 25-letnia uprawa orzecha włoskiego w systemie alejowym miała korzystny wpływ na plon groszku w międzyrzędziach pod względem ograniczenia wiosennej suszy glebowej (9). Podobnie pozytywne oddziaływanie drzew we współrzędnej uprawie jęczmienia dla fazy wypełniania ziarna przedstawili Arenas-Corraliza i in. (1) dla warunków hiszpańskich. W uprawie soi z wielogatunkowymi rzędami drzew w Kanadzie stwierdzono, że w warunkach suchego i ciepłego roku rośliny plonowały wyżej w odległości 12 i 20 m od zadrzewienia niż na poletku kontrolnym (23). Stres konkurencji roślin w uprawach alejowych może zostać ograniczony przez stosowanie praktyk pielęgnacyjnych, takich jak: przycinanie korzeni czy koron drzew, dopasowanie więzby, stosowanie okrywy glebowej (mulczu, poplonów), uprawy konserwującej czy wykorzystanie do uprawy gatunków o wyższej tolerancji na zacienienie. Jacobs i in. (31) podsumowali badania nad wpływem drzew na mikroklimat i bilans wodny w uprawach alejowych w strefie umiarkowanej, zauważając, że silne efekty ich oddziaływania zaobserwowano tylko w obrębie rzędów lub w bliskiej odległości od drzew, podczas gdy wilgotność gleby w dalszej odległości zależała od specyficznych uwarunkowań lokalnych oraz roślinności.

Uprawy współrzędne w sadach są również pod wpływem specyficznego mikroklimatu stworzonego przez rzędy drzew. Stwierdzono wyraźną poprawę plonowania w przypadku warzyw korzeniowych wysiewanych wiosną i kończących wegetację latem (np. rzodkwi zwyczajnej) (48). Można założyć, że rośliny, które wymagają lepszych gleb, ale są bardziej odporne na suszę, korzystają lepiej z warunków stworzonych przez systemy rolno-leśne (wzrost zawartości materii organicznej oraz mineralizacji azotu). Zmiany mikroklimatu w sadzie wynikają ze spadku temperatury w ciągu dnia w sąsiedztwie drzew (do $1,5^{\circ}\text{C}$ w odległości 1,5 m od drzew) i wzrostu wilgotności gleby. Jednocześnie zaobserwowano wzrost temperatury o 2°C pod drzewami późnym popołudniem. Zjawisko to wynika między innymi z blokowania ciepła odbitego z gruntu przez korony drzew oraz uwalniania przez drzewa ciepła nagromadzonego podczas dnia (21, 55, 62).

Próbując wyjaśnić złożoność przepływu ciepła w systemach alejowych, Wang i in. (62) opracowali model bilansu wodnego dla uprawy współrzędnej w sadzie w systemie gleba-roślina-atmosfera (rys. 21) w połączeniu z modułem transportu wody w glebie. Jednocześnie wykonano eksperyment polowy w trzech wariantach: jabłonie + odkryta gleba; jabłonie + pas kupkówki pospolitej o szerokości 2,8 m, koszony

4–5 razy, aby utrzymać niskie pokrycie gleby; jabłonie + pas kupkówki pospolitej o tej samej szerokości, koszony 2–3 razy, aby utrzymać wysokie pokrycie gleby. Symulacje modelu dla wielolecia wykazały, że wariant z często koszoną kupkówką najbardziej ograniczył stratę wody wskutek ewapotranspiracji, zachowując największą jej ilość w glebie międzyrzędzia. W pierwszych 8 latach wzrostu jabłonie były wrażliwe na konkurencję o wodę ze strony trawy, ponieważ większość systemu korzeniowego drzew znajdowała się w zasięgu korzeni traw. Trawa koszona częściej ograniczyła transpirację drzew o 2,1%, podczas gdy kupkówka koszona rzadziej zmniejszyła transpirację o 7%. Z przeprowadzonych badań wynika, że zwiększenie częstości pokosu trawy w międzyrzędziach podnosi efektywność zużycia wody przez rośliny i w warunkach suszy glebowej poprawia gospodarowanie wodą w uprawach alejowego systemu rolno-leśnego.



Rys. 21. Schemat przepływu utajonych strumieni ciepła oraz oporów w systemie alejowym, gdzie:

$\lambda E_p, \lambda E_s$ i λE_s – strumienie ciepła utajonego z drzew, rośliny współrzędnej i gleby. Zakłada się, że te trzy rodzaje ciepła utajonego są transportowane z powierzchni parowania na średni poziom warstwy granicznej łąnu roślin uprawnych oraz warstwy granicznej drzew, a następnie do warstwy referencyjnej systemu;

r_s^t, r_s^c i r_s^s – opory roślinności odpowiednio dla drzew, rośliny współrzędnej i gleby;

r_a^t i r_a^c – opory na skraju nowej powierzchni czynnej, kolejno dla warstwy granicznej drzew i warstwy granicznej łąnu rośliny współrzędnej;

r_a^{st} i r_a^{sc} – opory aerodynamiczne między powierzchnią gleby a kolejno średnim poziomem warstwy granicznej drzew i warstwy granicznej łąnu rośliny współrzędnej;

$r_a^{a,t}$ – opór aerodynamiczny między średnim poziomem warstwy granicznej łąnu roślin a warstwą referencyjną systemu alejowego;

$r_a^{a,c}$ – opór aerodynamiczny między średnim poziomem warstwy granicznej drzew i warstwy granicznej łąnu rośliny współrzędnej.

Trudno ocenić rolę systemów leśno-pastwiskowych w ochronie zasobów wodnych, z uwagi na duże różnice w układzie drzew posadzonych na użytkach zielonych. Bardzo często są to systemy o układzie naturalnym lub nieregularnym, dostosowanym do lokalnych warunków ukształtowania terenu i stosunków wodnych. Jednak ich potencjał w zakresie ograniczenia strat spływu wód powierzchniowych jest uważany za największy spośród wszystkich systemów rolno-leśnych. Globalna metaanaliza w zakresie systemów rolno-leśnych (69) wykazała, że procent zmniejszenia strat wody przez systemy leśno-pastwiskowe był średnio wyraźnie wyższy (73%) niż w przypadku systemów rolno-leśnych z uprawami (43%) oraz zadrzewionych pasów buforowych (57%). W zbiorowiskach traw pastwisk leśnych w Szwajcarii zaobserwowano większą odporność roślin na suszę niż w zbiorowiskach pastwisk otwartych (25). Pozytywny wpływ drzew na plonowanie traw w klimacie umiarkowanym jest zwykle obserwowany w przypadku stresu suszy o średnim nasileniu (29).

Utrzymywanie niskich i równo rozmieszczonych drzew na pastwisku może zachęcać zwierzęta do korzystania z zacienienia o relatywnie wąskiej powierzchni i w efekcie ugniatania racicami miejsc w pobliżu drzew, niszcząc występującą tam run i drzewa oraz potencjalnie zwiększając spływ powierzchniowy (16, 38). Bardziej korzystne będą drzewa wyższe, rzucające dłuższy cień lub sieć żywopłotów zwiększająca powierzchnię zacienienia dla wypasanych zwierząt. Zadrzewienia kępowe na pastwiskach wielokrotnie zwiększają infiltrację i intercepcję w porównaniu z systemem leśno-pastwiskowym z drzewami o równomiernym rozmieszczeniu. Najbardziej skuteczne w ochronie przed powodzią i erozją wodną są ogrodzone zadrzewienia kępowe z podszytem, nasadzone przy dolnej krawędzi zbocza lub w połowie stoku (38).

Wnioski

1. Rozpatrując krążenie wody w krajobrazie, należy uwzględnić jednocześnie bilans promieniowania, bilans ciepła oraz bilans wody. Rozkład opadów i użytkowanie gruntu mają decydujący wpływ na strukturę bilansu cieplnego – udział parowania i ciepła jawnego.
2. W zlewniach o niskiej retencji pokrycie ich roślinnością odgrywa ważniejszą rolę dla obiegu wody niż wpływ zmian klimatycznych. Obszary zadrzewione posiadają istotny wpływ na bilans wodny zlewni poprzez wzrost ewapotranspiracji i ograniczenie spływu powierzchniowego. Zwykle drzewa zużywają na intercepcję i transpirację znacząco więcej wody niż większość pozostałych typów zbiorowisk roślinnych. Często dzieje się to kosztem zasobów wody gruntowej, do których mają dostęp głębsze korzenie drzew.
3. Występowanie zadrzewień śródpolnych zakłóca ruch powietrza, powodując tworzenie się wirów o różnym charakterze, początkowo przechwytyjących parę wodną, a następnie, jeśli warunki na to pozwalają, mieszających przypowierzch-

niowe warstwy powietrza, co w efekcie ogranicza wymianę gazów pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą, w tym przepływ pary wodnej.

4. Wysokość zadrzewienia i prędkość wiatru na otwartej przestrzeni są głównymi czynnikami wpływającymi na zasięg wiatrochronnego oddziaływania, podczas gdy porowatość zadrzewienia jest krytycznym czynnikiem określającym wielkość redukcji prędkości wiatru.
5. Im dłuższy pas zadrzewienia, tym większa powierzchnia gruntu rolnego może korzystać z ochrony przed parowaniem. Ogólna zasada mówi, że długość pasa powinna być większa niż 10 wysokości zadrzewienia.
6. Pas zadrzewienia w największym stopniu ogranicza prędkość wiatrów, jeśli jest zlokalizowany prostopadłe do dominującego kierunku wiatru. Najbardziej skuteczna jest lokalizacja pasów wiatrochronnych na obszarze płaskiego terenu.
7. W efekcie oddziaływania półprzepuszczalnych pasów przeciwwietrznych następuje wzrost plonowania roślin uprawnych znajdujących się w strefie oddziaływania zadrzewień. Wiatrochronne zadrzewienia zmniejszają plony w latach o średnich lub ponadprzeciętnych opadach deszczu, ale zwiększają je w suchych, wietrznych warunkach.
8. Drzewa uprawiane w systemach alejowych w silnej więźbie (tak jak w przypadku drzew krótkiej rotacji) poprawiają bilans wodny pola, z reguły na zasadzie spełniania funkcji przeciwwietrznych. W warunkach suszy, szczególnie na glebach lekkich, drzewa są zmuszone do wydłużania systemu korzeniowego w głąb gleby, aby ograniczyć konkurencję o wodę z innymi drzewami.
9. Drzewa nasadzone w luźniejszych odstępach od siebie (np. drzewa owocowe lub z przeznaczeniem na drewno wysokiej jakości) są o wiele mniej efektywne w poprawie mikroklimatu, ale w wyniku mniejszej szerokości międzyrzędzi mogą mieć wyraźniejszy wpływ na obniżenie temperatury dziennej w łanie roślin uprawnych, ograniczenie spływu powierzchniowego i wzrost wilgotności gleby.
10. Stres wodny roślin uprawianych w systemach alejowych może zostać ograniczony przez stosowanie praktyk pielęgnacyjnych, takich jak: przerzedzanie drzew, przycinanie korzeni i koron drzew, dopasowanie więźby, praktyki uprawowe (stosowanie okrywy glebowej – mulczu, poplonów, uprawy konserwującej) czy wykorzystanie do uprawy gatunków o wyższej tolerancji na zacienienie.
11. Systemy leśno-pastwiskowe mogą znacząco ograniczyć spływ wód powierzchniowych. Najbardziej korzystne dla bilansu wodnego na pastwisku są drzewa wysokie rzucające dłuższy cień, sieć żywopłotów zwiększająca powierzchnię zacienienia dla wypasanych zwierząt lub ogrodzone zadrzewienia kępowe zlokalizowane przy dolnej krawędzi zbocza lub w połowie stoku.

12. W krótkim okresie zadrzewienia śródpolne i systemy rolno-leśne mogą niekorzystnie oddziaływać na zlewnię, ale w dłuższej perspektywie czasowej, zwłaszcza jeśli są odpowiednio rozmieszczone w krajobrazie, zwiększają retencję i poprawiają jakość wody oraz regularność przepływów cieków, a przy odpowiednich uwarunkowaniach struktury roślinności przyczyniają się również do poprawy mikroklimatu.

Literatura

1. Arenas-Corraliza M.G., López-Díaz M.L., Moreno G.: Winter cereal production in a Mediterranean silvoarable walnut system in the face of climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **264**: 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.024>
2. Argete J.C., Wilson J.D.: The microclimate in the centre of small square sheltered plots. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, **48**, 1-2: 185-199. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90016-6)
3. Asghar M.A., Du J., Jiang H., Li Y., Sun X., Shang J., Liu J., Liu W., Imran S., Iqbal N., Ahmad B., Hussain S., Yu L., Liu C., Yang W.: Shade pretreatment enhanced drought resistance of soybean, *Environmental and Experimental Botany*, 2019, **171**: 103952. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103952>
4. Badorreck A., Uckert G., Keutmann S., Guse T., Quinkenstein A., Böhm C., Freese D.: Agroforstsysteme als eine an zunehmende Trockenheit angepasste Form der Landnutzung, In: *Land- Und Ernährungswirtschaft Im Klimawandel; Auswirkungen, Anpassungsstrategien Und Entscheidungshilfen*, R. Bloch, J. Bachinger, R. Fohrmann, R. Pfriem (eds). Vol. *Klimawandel in Regionen Zukunftsfähig Gestalten*. München, Niemcy, 2014, pp. 125-135.
5. Baldwin C.S.: The influence of field windbreaks on vegetable and specialty crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **22**: 191-203. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90018-7)
6. Bayala J., Prieto I.: Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. *Plant and Soil*, 2020, **453**: 17-28. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04173-z>
7. Bertness M.D., Callaway R.: Positive interactions in communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 1994, **9**(5): 191-193. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(94\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90088-4)
8. Bird P.R., Jackson T.T., Kearney G.A., Roache A.: Effects of windbreak structure on shelter characteristics. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2007, **47**(6): 727-737. <https://doi.org/10.1071/EA06086>
9. Blanchet G., Barkaoui K., Bradley M., Dupraz C., Gosme M.: Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2022, **208**(5): 583-598. <https://doi.org/10.1111/jac.12488>
10. Böhm C., Kanzler M., Freese D.: Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. *Agroforestry Systems*, 2014, **88**: 579-591. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9700-y>
11. Borek R., Mosquera-Losada M.: Trawy i rośliny bobowate odporne na zacielenie. Broszura AFINET, 2019. https://euraf.isa.utl.pt/files/pub/20191014_factsheet_43_pl_web_0.pdf
12. Brande J.R., Hodges L., Zhou X.H.: Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems*, 2004, **61**: 65-78. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028990.31801.62>
13. Cablík J., Jůva K.: Protierozní ochrana půdy. SZN, Praha, 1963, pp. 324.
14. Caldwell M.M., Dawson T.E., Richards J.H.: Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*, 1998, **113**: 151-161. <https://doi.org/10.1007/s004420050363>

15. Carrick J., Abdul Rahim M.S.A.B., Adjei C., Ashraa Kalee H.H.H., Banks S.J., Bolam F.C., Campos Luna I.M., Clark B., Cowton J., Domingos I.F.N., Golicha D.D.: Is planting trees the solution to reducing flood risks? *Journal of Flood Risk Management*, 2019, **12**(S2): p.e12484. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12484>
16. Chandler K.R., Stevens C.J., Binley A., Keith A.M.: Influence of tree species and forest land use on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation. *Geoderma*, 2018, **310**: 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.011>
17. Cleugh H.A., Hughes D.E.: Impact of shelter on crop microclimates: a synthesis of results from wind tunnel and field experiments. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2002, **42**(6): 679-701. [10.1071/EA02005](https://doi.org/10.1071/EA02005)
18. Cleugh H.A.: Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, 1998, **41**: 55-84. <https://doi.org/10.1023/A:1006019805109>
19. Cornelis W.M., Gabriels D.: Optimal windbreak design for wind-erosion control. *Journal of Arid Environments*, 2005, **61**(2): 315-332. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.10.005>
20. Day W., Legg B.J., French B.K., Johnston A.E., Lawlor D.W., Jeffers W.D.C.: A drought experiment using mobile shelters: The effect of drought on barley yield, water use and nutrient uptake. *The Journal of Agricultural Science*, 1978, **91**: 599-623. <https://doi.org/10.1017/S0021859600059992>
21. Dupont S., Patton E.G.: Influence of Stability and Seasonal Canopy Changes on Micrometeorology within and above an Orchard Canopy: The CHATS Experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **157**: 11-29. <https://doi.org/10.48044/jauf.1993.049>
22. Espeleta J.F., West J.B., Donovan L.A.: Species-specific patterns of hydraulic lift in co-occurring adult trees and grasses in a sandhill community. *Oecologia*, 2004, **138**: 341-349. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1460-8>
23. Gagné G., Lorenzetti F., Cogliastro A., Rivest D.: Soybean performance under moisture limitation in a temperate tree-based intercropping system. *Agricultural Systems*, 2022, **201**: 103460. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103460>
24. Gardiner B., Palmer H., Hislop M.: The principles of using wood for shelter. Forestry Commission, 2006, UK, pp. 8. <https://cdn.forestryresearch.gov.uk/2006/03/fcin081.pdf>
25. Gavazov K., Spiegelberger T., Buttler A.: Transplantation of subalpine wood-pasture turfs along a natural climatic gradient reveals lower resistance of unwooded pastures to climate change compared to wooded ones *Oecologia*, 2014, **174**(4): 1425-1435. [doi:10.1007/s00442-013-2839-9](https://doi.org/10.1007/s00442-013-2839-9)
26. Ghazavi G., Thomas Z., Hamon Y., Marie J.C., Corson M., Merot P.: Hedgerow impacts on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2008, **22**(24): 4723-4735. <https://doi.org/10.1002/hyp.7081>
27. Ghazavi R., Thomas Z., Hamon Y., Merot P.: Soil water movement under a bottomland hedgerow during contrasting meteorological conditions. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(9): 1431-1442. <https://doi.org/10.1002/hyp.7909>
28. Heisler G.M., De Walle D.R.: Effects of windbreak structure on wind flow. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **22/23**: 41-69. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90007-2)
29. Hernández-Salmerón I.R., Holmgren M.: Global meta-analysis: Sparse tree cover increases grass biomass in dry pastures. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 949185. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.949185>
30. Hoek van Dijke A.J., Herold M., Mallick K., Benedict I., Machwitz M., Schlerf M., Pranindita A., Theeuwes J.J., Bastin J.F., Teuling A.J.: Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nature Geoscience*, 2022, **15**(5): 363-368. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00935-0>

31. Jacobs S.R., Webber H., Niether W., Grahmann K., Lüttschwager D., Schwartz C., Breuer L., Bellingrath-Kimura S.D.: Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, **323**: 109065. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109065>
32. Jaehne S.C., Dohrenbusch A.: Ein Verfahren zur Beurteilung der Bestandesdiversität. *Forstwiss Cent*, 1997, **116**: 333-345. <https://doi.org/10.1007/BF02766909>
33. Judd M.J., Raupach M.R., Finnigan J.J.: A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: velocity fields. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, **80(1-2)**: 127-165. <https://doi.org/10.1007/BF00119015>
34. Kanzler M., Böhm C., Mirck J., Schmitt D., Veste M.: Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 2019, **93**: 1821-1841. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0289-4>
35. Kędziora A.: Podstawy agrometeorologii. PWRiL, 1999, ss. 364.
36. Kujawa A., Kujawa K., Zajączkowski J., Borek R., Tyszkowski P., Chmielowiec P., Chmielowiec-Tyszkowski D., Jóźefczuk J., Krukowska-Szopa I., Śliwa P., Witkoś-Gnach K.: Zadrzewienia na obszarach wiejskich – dobre praktyki i rekomendacje. Fundacja Ekorozwoju, Wrocław, 2018. <http://drzewa.org.pl/publikacja/1655-2/>
37. List H.H., White J.C.: Plant hydraulic lift of soil water—implications for crop production and land restoration. *Plant and Soil*, 2008, **313**: 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9696-z>
38. Lunka P., Patil D.S.: Impact of tree planting configuration and grazing restriction on canopy interception and soil hydrological properties: implications for flood mitigation in silvopastoral systems. *Hydrological Processes*, 2016, **30**: 945-958. <https://doi.org/10.1002/hyp.10630>
39. Markwitz C., Knohl A., Siebicke L.: Evapotranspiration over agroforestry sites in Germany. *Biogeosciences*, 2020, **17**: 5183-5208. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5183-2020>
40. Markwitz C., Siebicke L.: Low-cost eddy covariance: a case study of evapotranspiration over agroforestry in Germany. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, **12**: 4677-4696. <https://doi.org/10.5194/amt-12-4677-2019>
41. Marshall J.K.: The effect of shelter on the productivity of grasslands and field crops. *Field Crop Abstracts*, 1967, **20**: 1-14.
42. Martin R.J., Jamieson P.D.: Effect of timing and intensity of drought on the growth and yield of field peas (*Pisum sativum* L.). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 1996, **24**: 167-174. <https://doi.org/10.1080/01140671.1996.9513949>
43. McNoughton K.: Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **22**: 17-39. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90006-0)
44. Neumann M., Starlinger F.: The significance of different indices for stand structure and diversity in forests. *Forest Ecology and Management*, 2001, **145(1-2)**: 91-106. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00577-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00577-6)
45. Norton R.L.: Windbreaks: Benefits to orchard and vineyard crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, **22**: 205-213. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90019-9](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90019-9)
46. Nosek Š., Kellnerov R., Jurčáková K., Jaňour Z., Chaloupecká H., Jakubcová M.: Effect of shelter porosity on downwind flow characteristics. *EPJ Web of Conferences*, EDP Sciences, 2016, **114**: 02084. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201611402084>
47. Pašák V.: Wind erosion on soils. *Scientific Monographs, Výzkumný ústav meliorací, Zbraslav nad Vltavou*, 1970.
48. Ramananjatovo T., Chantoiseau E., Guillermin P., Gu'enon R., Delaire M., Buck Sorlin G., Cannavo P.: Growth of vegetables in an agroecological garden/orchard system: The role of spatiotemporal variations of microclimatic conditions and soil properties. *Agronomy*, 2021, **11**: 1888. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091888>

49. Řeháček D., Khel T., Kučera J., Vopravil J., Petera M.: Effect of windbreaks on wind speed reduction and soil protection against wind erosion. *Soil and Water Research*, 2017, **12**(2): 128-135. <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/swr/2017/02/07.pdf>
50. Rutkowski P.: Woda w ekosystemach leśnych Wielkopolski. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 2008, **10**(2[18]): 236-241. <https://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmetal.element.agro-article-36735b1e-a10d-48fb-bd91-d27e2ac909e2/c/Rutkowski.pdf>
51. Ryszkowski L., Kędziora A.: Modification of water flows and nitrogen fluxes by shelterbelts. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(4): 388-400. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.023>
52. Schippers B., Schroth M.N., Hildebrand D.C.: Emanation of water from underground plant parts. *Plant Soil*, 1967, **27**: 81-91. <https://doi.org/10.1007/BF01373979>
53. Schmidt M., Jochheim H., Kersebaum K.C., Lischeid G., Nendel C.: Gradients of microclimate, carbon and nitrogen in transition zones of fragmented landscapes—a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **232**: 659-671. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.022>
54. Shi X., Conway-Anderson A.: Assessing the sustainability of silvopasture systems. *CABI Reviews*, 2022. <https://doi.org/10.1079/cabireviews202217047>
55. Souch C.A., Souch C.: The Effect of Trees on Summertime below Canopy Urban Climates: A Case Study Bloomington, Indiana. *Arboricultural Journal*, 1993, **19**: 303-312.
56. Sudmeyer R., Bicknell D., Coles N.: Tree windbreaks in the wheatbelt. Department of Primary Industries and Regional Development, Western Australia, Perth. Bulletin 4723, 2007, pp. 27. <https://library.dpird.wa.gov.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1196&context=bulletins>
57. Sudmeyer R.A., Adams M.A., Eastham J., Scott P.R., Hawkins W., Rowland I.C.: Broadacre crop yield in the lee of windbreaks in the medium and low rainfall areas of south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2002, **42**(6): 739-750. <https://doi.org/10.1071/EA02011>
58. Thomas Z., Ghazavi R., Merot P., Granier A.: Modelling and observation of hedgerow transpiration effect on water balance components at the hillslope scale in Brittany. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(26): 4001-4014. <https://doi.org/10.1002/hyp.9198>
59. Vacek Z., Řeháček D., Cukor J., Vacek S., Khel T., Sharma R.P., Kučera J., Král J., Papaj V.: Windbreak efficiency in agricultural landscape of the Central Europe: multiple approaches to wind erosion control. *Environmental Management*, 2018, **62**: 942-954. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1090-x>
60. van Noordwijk M., Barges-Tobella A., Muthuri C., Gebrekirstos A., Maimbo M., Leimona L., Bayala J., Xing M., Lasco R., Xu J., Ong C.K.: Trees as part of nature-based water management. In: Sustainable development through trees on farms: agroforestry in its fifth decade, van Noordwijk M. et al. (eds). Bogor, Indonesia: World Agroforestry (ICRAF) Southeast Asia Regional Program, 2019, pp. 299-327. <https://apps.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/BC19024.pdf>
61. Wang H., Takle E.S.: Momentum budget and shelter mechanism of boundary-layer flow near a shelterbelt. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, **82**: 417-437. <https://doi.org/10.1023/A:1000262020253>
62. Wang Z., Wu Y., Cao Q., Shen Y., Zhang B.: Modeling the coupling processes of evapotranspiration and soil water balance in agroforestry systems. *Agricultural Water Management*, 2021, **250**: 106839. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106839>
63. Wołoszyn E.: *Meteorologia i klimatologia w zarysie*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2009, ss. 357.
64. Wu T., Zhang P., Zhang L., Wang J., Yu M., Zhou X., Wang G.G.: Relationships between shelter effects and optical porosity: A meta-analysis for tree windbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **259**: 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.04.013>

-
65. Wu Y.S., Feng Y.A.N.G., Gong W.Z., Ahmed S., Fan Y.F., Wu X.L., Yong T.W., Liu W.G., Kai S.H.U., Jiang L.I.U., Du J.B.: Shade adaptive response and yield analysis of different soybean genotypes in relay intercropping systems. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, **16**(6): 1331-1340. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61525-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61525-3)
66. Yoder C.K., Nowak R.S.: Hydraulic lift among native plant species in the Mojave Desert. *Plant Soil*, 1999, **215**: 93-102 <https://doi.org/10.1023/A:1004729232466>
67. Zajączkowski J., Zajączkowski K.: *Hodowla lasu. Zadrzewienia*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 2013, ss. 179.
68. Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R.: Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, **37**(3): 701-708. <https://doi.org/10.1029/2000WR900325>
69. Zhu X., Liu W., Chen J., Bruijnzeel L.A., Mao Z., Yang X., Cardinael R., Meng F.R., Sidle R.C., Seitz S., Nair V.D.: Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: a review of evidence and processes. *Plant and Soil*, 2020, **453**: 45-86. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04377-3>
-

Adres do korespondencji:

dr inż. Robert Borek
Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. 81 4786 763
email: rborek@iung.pulawy.pl

AUTOR
Robert Borek

ORCID
0000-0001-9414-3181