

# Vliv větru na transpiraci a fotosyntézu

**Pohyb vzduchu – vítr – je důležitým faktorem výparu vody z mokrého povrchu i z listů rostlin. Zkušenost, kterou zažíváme na vlastní kůži a kterou se lidé naučili kvantifikovat před 75 lety, působila po stovky milionů let jako selekční faktor při evoluci listu, rostlin a jejich společenstev. Vítr zvyšuje výpar vody z listu, transpiraci, i příjem oxidu uhličitého do listu, fotosyntézu při nezměněné otevřenosti průduchů, tedy obecně urychluje výměnu plynů mezi listem a atmosférou. Změny v rychlosti větru proto iniciují změny životně důležitých pochodů i podmínek, za kterých probíhají, např. teploty listu, a v reakci na ně zpětně otevírání i zavírání průduchů nebo účinnost využití vody rostlinou. Představuje předpokládané snížení průměrné rychlosti větru v měřítku kontinentů ohrožení této účinnosti? Mají třeba listy osiky s dlouhým řapíkem třepotající se i při mírném větru nějakou selekční výhodu oproti tuhým přisedlým listům? Těmito a podobnými otázkami se zabývá následující text, a doplňuje tak spektrum témat souvisejících s větrem, jimž bylo věnováno předchozí číslo Živy (2024, 5).**

## Výpar a transpirace: co je řídí?

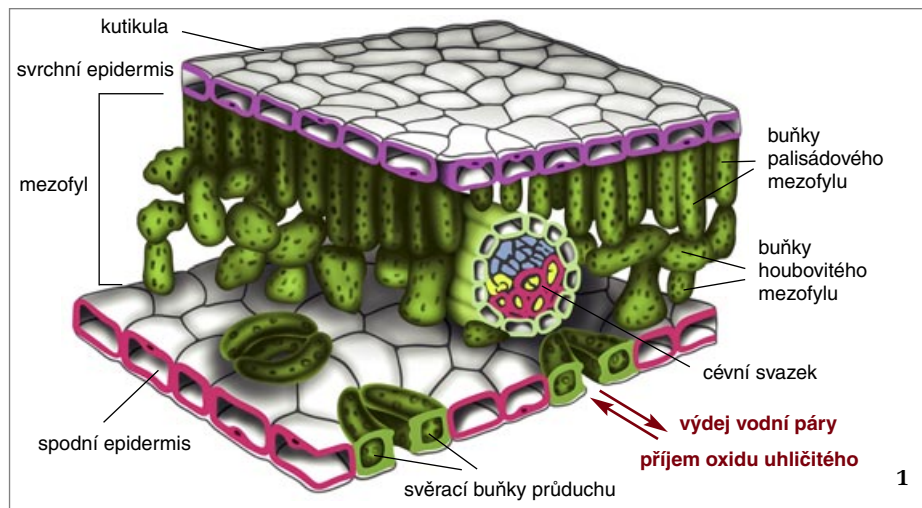
Cizí slovo transpirace označuje ztrátu vody z listů rostlin ve formě vodní páry. Tedy téměř totéž, co označuje slovo výpar (evaporace). V případě transpirace však nejde jen o fyzikální proces výparu, ale i o děj regulovaný fyziologickými pochody listu, především otevíráním a zavíráním průduchů (stomat) – miniaturních ventilů na listech rostlin, tvořených dvěma svěřacími buňkami. Výpar, např. z hladiny vody – moří, rybníků – či z vlhké holé půdy, nebo třeba z mokrého prádla, je řízen třemi hlavními faktory. Přísunem a výdejem energie z okolí a do něj, tedy energetickou bilancí výparného povrchu, která, pokud je vyrovnaná, se projevuje stálou teplotou povrchu, a dynamikou proudění vzduchu – větrem. Třetím faktorem rozhodujícím o tom, za jak dlouho vyschne kaluž nebo uschne prádlo, je vlhkost okolního vzduchu. Čím bude vzduch sušší (bude vyšší deficit tlaku

vodní páry do nasycení), tím rychleji se bude voda přenášet difuzí od vlhkého povrchu přes klidnou nemíchanou vrstvu vzduchu, tzv. hraniční vrstvu, do okolní turbulentní atmosféry.

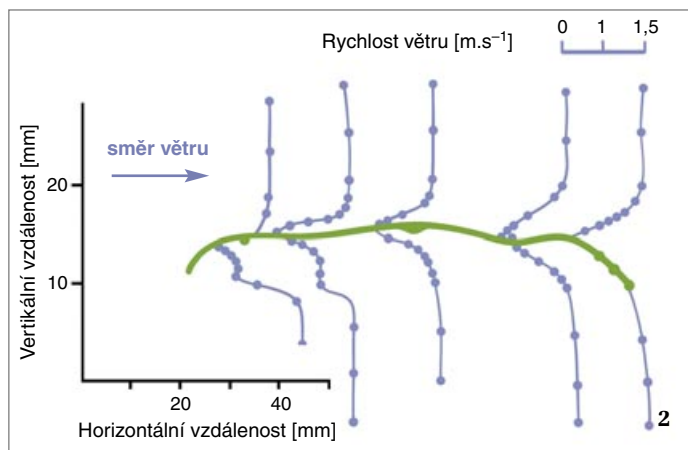
Všechny tři faktory rozhodující o výparu elegantně zkombinoval pro výpočet rychlosti výparu (např. hmotnosti vody vypařené za sekundu z metru čtverečního povrchu) a poprvé publikoval už v r. 1948 britský meteorolog Howard L. Penman. Díky jeho průlomové práci mohli hydro-meteorologové mimo jiné spočítat, kolik vody se vypaří z oceánů za jednotku času, a zpřesnit odhady jednotlivých složek globálního koloběhu vody. Potřebovali jen běžně měřené meteorologické údaje o intenzitě slunečního záření, teplotě a vlhkosti vzduchu a rychlosti větru – proudění vzduchu v horizontálním směru. Potud stručně výpar a fyzika prostředí. Jak je to ale v případě, kdy do fyzikálních konstant a para-

metrů prostředí zasáhne živý organismus schopností bránit se výparu – co se stane s transpirací a vlivem větru na její rychlost?

Obecné paradigma výzkumu transpirace zní, že vzduch v mezibuněčných prostorech listu je téměř nasycený vodní párou (má relativní vlhkost např. 99,5 %). Víru, že to tak skutečně je, podporuje fakt, že rostlina i ve chvíli, kdy strádá nedostatkem vody a vadne, má vodní potenciál (tlak, kterým list nasává vodu, vyjádřený se záporným znaménkem) nepříliš vzdálený potenciálu destilované vody (tedy nule), typicky do –20 bar. Z fyzikální chemie víme, že tuto hodnotu má vzduch, který se nachází v rovnováze s čistou vodou a je z 98,5 % nasycen vodní párou. I ve vadnoucím listu by tedy měl být vzduch, který je ve styku s celulózovými stěnami buněk prosycený vodou, téměř nasycený vodní párou. Přijmeme tento dedukci (nikoli přímým měřením) podpořený předpoklad i přesto, že jsou k němu v poslední době vážné výhrady (např. Lucas Cernusak z australské James Cook University nebo Fulton Rockwell z americké Harvardské univerzity). Pak výpar vody uvnitř listu a transport páry ven do okolního vzduchu (obr. 1) řídí stejné faktory prostředí jako v případě hladiny vody (teplota listu, vlhkost vzduchu nad listem a vítr), ale navíc do hry velmi podstatně vstupuje „vůle rostliny“ – regulovatelný difuzní odpor průduchů. Intuice, podpořená zkušeností těch, kdo si řídí vlasy, říká, že silný proud horkého suchého vzduchu vysuší mokré objekt nejrychleji. Rostliny jsou ale evolučně vybavené schopností vzdorovat ztrátě vody, hydraulickému kolapsu a smrti hlavně a mimo jiné tím, že uzavřou průduchy. Tyto miniaturní ventily, kterých je na 1 mm<sup>2</sup> listu řádově od desítek po tisíce, tak mohou oddělit vlhký, vodou nasycený vnitřek listu od vnější suché, po vodě „dychtivé“ atmosféry. Představují odpor pro transport páry kolísající od svého maxima při úplném zavření průduchů po minimální hodnotu při plném otevření. Ani při plném otevření ale obvykle nezabírají průduchové štěrbinové více než 2 % celkové plochy listu. Přesto, díky početnosti a rozmístění průduchů, může být maximální výpar z listu blízký výparu z volné hladiny vody. S ohledem na uvedené konstrukční a funkční vlastnosti listu navrhl v 60. letech britský biofyzik John L. Monteith úpravu Penmanovy rovnice, která při výpočtu transpirace zahrnuje i průduchový odpor.



**1** Anatomická stavba typického plochého (dorziventrálního) listu suchozemských rostlin s buňkami obsahujícími chloroplasty (zeleně, buňky palisádového a houbovitého parenchymu – mezofyl, a svěřací buňky průduchů na spodní pokožce listu – hypostomatický list), bílými buňkami svrchní (fialové ohraničení na řezu) a spodní (červené) pokožky (epidermis) a buňkami cévního svazku (žluté a modré). Pokožkové buňky mají na povrchu kutikulu, která transpiraci umožňuje jen v malé míře. Buněčné stěny mezofylových buněk jsou nasyceny kapalnou vodou a prostory mezi buňkami vyplněné vzduchem, který je (téměř) nasycen vodní párou. Ta uniká difuzí po gradientu své koncentrace ven z listu průduchovými póry – štěrbinami mezi svěřacími buňkami



průduchů, které bývají u většiny druhů suchozemských rostlin pouze ve spodní pokožce. Stejnými póry, ale v protisměru, tedy dovnitř listu, difunduje oxid uhličitý, který list využívá pro syntézu cukrů při fotosyntetické asimilaci  $\text{CO}_2$ , probíhající v mezofylových buňkách, v chloroplastech (černé elipsovitě útvary uvnitř mezofylových buněk).

**2** Schéma rozložení rychlostí proudění vzduchu nad a pod listem (modré křivky a body) v závislosti na horizontální vzdálenosti od okraje listu (náběžné hrany) a na vertikální vzdálenosti od povrchu listu (zeleně). Měření ve větrném tunelu byla prováděna na listu topolu kanadského (*Populus canadensis*, syn. *P. xeuramericana*) při rychlosti laminárního proudění volného vzduchu zhruba  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

Rychlost proudění se ve vertikálním směru od povrchu listu zvyšuje od 0 do asi  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ . Tloušťka hraniční vrstvy vzduchu, tedy vrstvy se sníženou rychlostí proudění proti volnému vzduchu, nad a pod listem je nepřímě úměrná rychlosti proudění ve volné atmosféře kolem listu. Upraveno podle: různé zdroje (obr. 1) a J. Grace a J. Wilson (1976, obr. 2), kreslila R. Bošková (obr. 1 a 2).

**3** Námraza na listu ostružiníku (*Rubus* sp.) ukazuje, že okraj listu – hrana, kde se proudící vzduch setkává poprvé s listem (náběžná hrana) – má nejmenší tloušťku hraniční vrstvy, a proto na ní kondenzuje vodní pára z okolního vzduchu snáze než na střední části listu. Při teplotě nižší než  $0^\circ\text{C}$  pak voda na okrajích mrazí a vytváří se bílé okraje z ledových krystalků. Foto J. Šantrůček

Světově uznávaná Penmanova–Monteithova rovnice nám může sloužit k tomu, abychom posoudili nebo předpověděli vliv faktorů prostředí včetně větru i vliv rostliny samé na rychlost transpirace (pro další informace viz např. Šantrůček in Procházka a kol. 1998). Použitím této rovnice dokážeme tedy zjistit, jak se zvýší transpirace např. při větší rychlosti větru a určité průduchové vodivosti.

### Vítr, hraniční vrstva vzduchu, výměna energie

Rychlý skok od pozorování k možnosti vypočítat rychlost transpirace nám ale zatím neodpověděl na otázku, proč se zvýší transpirace z listu nebo výpar z mokrého povrchu při rychlejší proudění vzduchu. Jednoduše, může za to rychlejší přenos lá-

tek (např. vody,  $\text{CO}_2$ ) a energie (tepla) přes už výše zmíněnou hraniční (nebo také mezní) vrstvu vzduchu, jejíž tloušťka, jak bude vysvětleno dále, se s rostoucí rychlostí větru ve volné atmosféře kolem listu zmenšuje, ale směrem ke středu listu se zvětšuje (obr. 2 a 3). Všichni jsme jistě na vlastní kůži zažili, jak poté, co jsme vylezli na plovárně z bazénu, nám začne být zima, když zafouká vítr. Větrém působením pocit ochlazování je primárně způsoben tím, že nás vítr „obnažil“ ještě víc, než jsme byli. Ztenčila se nemíchaná vrstvička vzduchu nad naší kůží – v nemíchané vrstvě vzduch proudí ve vrstvách rovnoběžných s povrchem (laminárně), ale vrstvy se vzájemně nepromíchávají. Tím se zkrátila dráha pro převážně difúzní přenos tepla konvekci z povrchu těla (první důvod „husí kůže“) i pro přenos vypařené vodní páry (výpar vody se děje na úkor latentního tepla výparu – druhý důvod pro „husí kůže“) do okolní volné atmosféry. Oba procesy, přenos tepla i vypařené vody z mokrého těla teplejšího než vzduch, mají tedy společného jmenovatele – hraniční vrstvu vzduchu, jejíž tloušťka závisí na rychlosti větru. Fyzikové znají empirický předpis pro vztah mezi tloušťkou vrstvy a rychlostí větru (tloušťka klesá s druhou odmocninou rychlosti), a je ji proto možné jednoduše spočítat – víme, že vrstva je řádově zlomky až jednotky milimetrů silná. Avšak o tloušťce hraniční vrstvy nerozhoduje jen rychlost větru, ale i rozměry a aerodynamická „drsnota“ povrchu. A tady je už větší prostor pro evoluční tvořivost přírody. Trichomy (chlupy na pokožce) na listech nebo chlupy na kůži dokážou tloušťku hraniční vrstvy zvětšit, a vliv větru na výpar nebo ochlazování tím snížit. Odtud tedy srst živočichů nebo naše „husí kůže“ jako obrana proti ochlazování, stejně jako na trichomy bohatý povrch listů u suchovzdorných nebo častým větrům exponovaných druhů rostlin. Z fyzikální podstaty jevu dále platí, že u okrajů listu je tloušťka klidné nemíchané hraniční vrstvy nejmenší, zatímco směrem ke středu listové čepele roste. Tento jev má svůj fyzikální důsledek v nižší teplotě okrajů sluncem ozářených listů a estetické vyjádření např. v ojíněných okrajích členitých listů po jasné podzimní noci nebo brzy na jaře (obr. 3).

Jiný evoluční důsledek téhož: obecně větší listy mají druhy v podrostu tropického deštného lesa (monstery, fíkovníky) než např. xeromorfní, na suchu adaptované středozemní keře. Zde hraje roli spíše ochlazování než transpirace, ale v pozadí je opět

hraniční vrstva modulovaná větrem. Čím větší rychlost větru, tím snadněji se ozářený list chladí, zvláště pak list s malou nebo hodně členitou listovou čepelí – členitost totiž zvětšuje délku okrajů.

### Vítr a účinnost využití vody rostlinami

Vítr je všudypřítomný jev. Zcela klidná atmosféra v přírodě téměř nikde neexistuje, a pokud se nám zdá, že se „ani lístek nepohne“, rychlost pohybu vzduchu bývá kolem  $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ . Maxima mohou přesahovat  $50 \text{ m.s}^{-1}$ , ale v našich podmínkách nejčastěji vane vítr rychlostí  $0,3$  až  $10 \text{ m.s}^{-1}$ . Přibližně v tomto rozmezí působil zřejmě po miliony let selekční tlak větru. Je důležité si uvědomit, že vítr podstatným způsobem ovlivňuje teplotu povrchu listů i výměnu plyných látek, hlavně vody a  $\text{CO}_2$ , společným principem – ovlivněním tloušťky hraniční vrstvy. Rostlina je v zásadě poikilotermní organismus, její teplota tedy kolísá shodně s teplotou okolí a metabolické teplo, kterým by se zahřála, je až na výjimky zanedbatelné. Přesto může být teplota listů při dostatečném ozáření sluncem o  $2$ – $6^\circ\text{C}$  i více vyšší než teplota okolního vzduchu, transpirace se během vegetační sezony pohybuje nejčastěji v rozmezí  $1$ – $10 \text{ mmol}$  (vody) na  $\text{m}^2$  (listu) za sekundu a fotosyntetický příjem  $1$ – $40 \text{ } \mu\text{mol}$  ( $\text{CO}_2$ ) na  $\text{m}^2$  (listu) za sekundu; vše v závislosti mimo jiné na rychlosti větru. Transpirace i fotosyntéza ještě kromě větru závisí na otevřenosti a četnosti průduchů na listu. Transpirace navíc zpětnově snižuje teplotu listu odvodem latentního (skupenského) tepla výparu.

Evoluce na pozadí fyzikálních podmínek včetně rychlosti větru vedla k selekci rostlin, které dokázaly nalézt životaschopný kompromis mezi několika protichůdnými požadavky – mezi potřebou ochladit se (rozptýlit radiačně získané teplo), neztratit přitom příliš mnoho vody (minimalizovat ztrátu vody transpirací) a současně získat dostatek  $\text{CO}_2$  z atmosféry (maximalizovat zisk uhlíku). Vítr chladí a usnadňuje přenos  $\text{CO}_2$  přes hraniční vrstvu, ale vede ke ztrátám vody jako cenného zdroje čerpaného z půdy a dopravovaného do listů za velkých nákladů, např. na uhlík potřebný pro stavbu kořenů a vodivého systému. Snížení nákladů na výstavbu pletiv a orgánů dopravujících vodu tím, že se zavřou průduchy a omezí se ztráta, a tedy i potřeba vody, vede ovšem i ke snížení zisku stavebního materiálu – uhlíku. Jak minimalizovat náklady a maximalizovat zisk (obr. 4)? Velmi obtížné řešení i pro evoluci rostlin.

Rostlina jako soliterní jedinec nemá mnoho možností, jak ovlivnit vliv větru nebo z něho uniknout (viz dále). Má ale možnosti, jak rychlosti větru přizpůsobit svou výměnu plynů tak, aby maximalizovala množství získaného uhlíku ( $A$ ) na jednotku vydané vody ( $E$ ) – účinnost využití vody ( $A/E$ ). Měřením a modelovými výpočty bylo zjištěno, že při malé míře otevřenosti průduchů (nízkých hodnotách průduchové vodivosti) se při rostoucí rychlosti větru zvyšuje poměr  $A/E$  (Schymansky a Or 2016). Je to tím, že oproti intuitivnímu očekávání se ztráta vody transpirací může snižovat s rostoucí rychlostí větru, protože vítr se stává dominantním faktorem snižujícím teplotu listu odvodem tepla konvekcí (podobně jako nápor vzduchu chladí motor nebo vodu v chladiči jedoucího auta). Tento účinek se zvyšuje s rostoucím rozdílem teploty mezi teplejším listem a chladnějším vzduchem. Vítr se tak jeví jako přirozený činitel, který sluncem ozářené rostliny dokáže využít ve svůj prospěch vhodným „vyladěním“ otevřenosti průduchů. List, zvláště ten osluněný, tedy může využít vítr k tomu, aby získal více  $\text{CO}_2$  při menší ztrátě vody. Překvapením také může být, že se vlhké povrchy (hladina vody, mokrá holá půda) chovají z hlediska výparu při rostoucí rychlosti větru jinak, často dokonce opačně, než suché povrchy objektů, jež jsou uvnitř vlhké, např. právě listy rostlin.

#### Od listu ke globálnímu měřítku, od vývinu jedince k evoluci druhu

V posledním desetiletí se objevují práce ukazující, že globálně klesá rychlost větru. V posledních 50 letech to bylo podle studie Tima R. McVicara a kol. (2012) o 0,9 až 1,7  $\text{cm s}^{-1}$  ročně na severní polokouli. Tento jev „globálního utišování větru“ je spojován s globálním oteplováním (Coumou a kol. 2015) nebo i s lidmi iniciovanými změnami ve využití krajiny (Luu a kol. 2023). Zatím jej lze hodnotit jako trend dokumentovaný v západní a střední Evropě, o jehož budoucím vývoji se diskutuje (Deng 2021). Důsledky na úrovni sluncem osvětleného listu už známe – s nižší rychlostí větru se snižuje jeho účinnost využití vody. Protože výměnu plynů, fotosyntézu i transpiraci, obstarávají hlavně ozářené části rostliny (koruny stromů), které jsou teplejší než vzduch, pravděpodobně se s globálním utišením větru snižuje účinnost, s jakou využívá vodu celý porost. Snižování účinnosti  $A/E$  při malé vodivosti průduchů se odhaduje až na 0,05–0,7 % ročně podle toho, zda počítáme s vysokou nebo nízkou průměrnou rychlostí větru (Schymansky a Or 2016). Pro srovnání, už několik desetiletí se zkoumá důsledek antropogenního zvyšování koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře na rychlost fotosyntézy a transpiraci od úrovně listu po globální vegetaci. Obecně panuje shoda, že terestrická vegetace reaguje zvyšováním účinnosti využití vody – fotosyntetická fixace  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) ve většině měření roste, zatímco transpirace ( $E$ ) klesá. To znamená opačný trend než při globálním snižování rychlosti větru. Zvýšení účinnosti  $A/E$  v důsledku stoupající koncentrace  $\text{CO}_2$  se pohybuje v rozmezí 0,15–0,7 % za rok. Zdá se tedy, že globální snižování rychlosti větru má potenciál částečně nahradit nebo i plně odstranit pozitivní vliv zvyšující



se koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře na účinnost využití vody suchozemskou vegetací.

Výše jsme popsali „fyzikální trik“ – konvektivní chlazení listu, které rostlina může využít k tomu, aby těžila ze zvýšené rychlosti větru. Zvyšuje účinnost, s jakou využívá vodu ( $A/E$ ), a ještě navíc snižuje absolutní množství transpirované vody ( $E$ ). Toto ale připadá v úvahu v prostředí, kde je rostlina dostatečně ozářená sluncem, vzduch není extrémně chladný a rychlosti větru nejsou extrémně velké. Dvě posledně jmenované meteorologické situace, studený silný vítr, nastávají častěji ve vysokých zeměpisných šířkách nebo ve vysokých horách. Aklimace a adaptace k těmto meteorologickým situacím vedou obvykle k vyhnutí se nepříznivým podmínkám nebo ke zvýšené toleranci prostředí. Zde mám na mysli např. vytváření vlakových forem stromů a kompresního dřeva vlivem silných větrů jednoho převládajícího směru nebo polštářové formy porostu některých vysokohorských druhů rostlin (např. Živa 2022, 1: 21–24; 2024, 5: CXXXIX–CXLI; kompresní dřevo je tmavěji zbarvené, s vyšším obsahem ligninu v místě ohybu kmene nahosemenných stromů – jehličnanů a jinanu – způsobeného často větrem, tvoří se na dolní, kompresní straně radiálního řezu kmenem, má odlišnou anatomii a mechanické vlastnosti). Posledně jmenované, např. v Alpách se vyskytující skalence poléhavá (*Kalmia procumbens*, syn. *Loiseleuria procumbens*), se vyznačují tím, že mohou mít nezdědka teplotu uvnitř „polštáře“ porostu i o 15 °C vyšší, než je teplota vzduchu v jejich okolí. Tím si vytvářejí vlastní mikroklima, kde fotosyntéza není limitována nízkou teplotou, jakou by zažívaly jako soliterní jedinci vystavení vysokohorským větrům. Jak je vidět, přírodní výběr, který se odehrává na úrovni druhu, formuje i koexistenci jedinců téhož druhu.

#### Vítr a výpar vody z třepotajících se listů

Na závěr bude dobré zmínit se o tom, co může vrtat hlavou bystrým a přemýšlivým pozorovatelům přírody. Jistě každý zná listy topolu osiky (*Populus tremula*) s dlouhými tenkými řapíky. Listy, které se i při mírném větru divoce třepotají ve všech směrech. Nebo jste viděli listy palem zmítané huri-

kánem. Fyzikové příčinu takového pohybu označují termínem přenos hybnosti ze vzduchu na list. Intuitivně bychom usoudili, že pohyb musí podstatně ovlivnit transpiraci. Je to skutečně tak? Kromě už zmíněného vlivu větru na tloušťku hraniční vrstvy jsou ve hře ještě nejméně tři další potenciální mechanismy. Zaprvé, prudký pohyb listu bude vytvářet rozdílný tlak vzduchu na protilehlých stranách listu, větší na návětrné straně, menší na závětrné. Spolu s celkovým tlakem vzduchu se mění i parciální tlak vodní páry, a pokud vzduch uvnitř listu považujeme za nasycený vodní párou a mající stejnou teplotu, bude jiný i výpar – větší ze strany s nižším tlakem, té závětrné, a naopak menší ze strany s vyšším tlakem. Je to tak proto, že výpar je úměrný gradientu (rozdílu) parciálních tlaků vodní páry uvnitř a vně listu. A parciální tlak vodní páry ve vzduchu je úměrný celkovému tlaku vzduchu. Zadruhé, prudký pohyb a rozdílný tlak na různých stranách listu, který má průduchy na obou stranách (amfistomatický list), může vést k tomu, že vzduch bude proudit hromadným tokem napříč listem. Taková ventilace skrz list by jistě vedla ke zvýšení odvodu vodní páry z mezibuněčných prostor jeho pletiva. Analogicky, jako když vydýchnete vodní párou nasycený vzduch z plic. Zatřetí, ohyb listové čepele při poryvech větru má jistě vliv na objem mezibuněčných prostor uvnitř listu. Při ohybu čepele dochází ke kompresi a vytlačení vzduchu průduchy ven a při narovnání, relaxaci, k nasátí vnější atmosféry. Takové periodické „pumpování“ vzduchu do listu a ven z něj může také zvýšit ztrátu vody z listu a rostliny. Jsou tři zmíněné mechanismy významné? Podle teoretických výpočtů prováděných pro rychlost větru 7  $\text{m s}^{-1}$  a praktického ověření s listy kukuřice seté (*Zea mays*) se zdá, že žádný z nich sám o sobě nezvyšuje transpiraci o více než desetiny procent (Woolley 1960).

Jaký je tedy evoluční smysl tenkých a dlouhých řapíků, které dovolují třepotavý pohyb listů i při mírném větru? Člověk konstruuje podpůrné stavby tak, aby byly dostatečně tuhé a pevné a odolaly např. náporům větru. Řapíky, které podpírají, nesou a vzhledem ke slunci vhodně natáčejí listo-



4 Text upraven k tématu článku se souhlasem Z. Renčínové. Orig. V. Renčín

5 až 7 Členitá čepel listů stromu australského vnitrozemí brachychitonu skalního (*Brachychiton rupestris*, obr. 5) a dlouhý řapík přispívají ke konvektivnímu chlazení sluncem ozářeného listu (blíže v textu). Řapík dovoluje intenzivní třepotavý pohyb listu i při malé rychlosti větru a výkroje čepele zmenšují vzdálenost mezi okraji napříč listem, prodlužují délku okrajů, a snižují tím střední tloušťku hraniční vrstvy nad čepelí při všech rychlostech a směrech větru. Dlouhý řapík listů topolu osiky (*Populus tremula*, 6) plní podobnou funkci. Údajně největší list ze všech druhů rostlin má palma *Raphia regalis* (7) ze západní Afriky (Gabonu) s celkovou délkou až 20 m a řapíkem dlouhým 5 m. Role řapíku a délky listu je vynést list do výšky, a docílit tak větší ozářenosti sluncem. Mechanické vlastnosti řapíku proto musejí být mimořádné, aby odolal náporům tropických bouří. Foto J. Šantrůček (obr. 5 a 6) a T. Couvreur (7)

vou čepel, evoluce konstruovala tak, že naopak vynikají schopností se ohýbat (flexibilitou) a kroutit (torzí). Extrémy v délce a pružnosti řapíku vidíme u druhů slunných stanovišť. Ze stromů běžných u nás jde třeba o zmíněný topol osiku (obr. 6) nebo meruňku obecnou (*Prunus armeniaca*), z cizích můžeme jmenovat např. strom australského vnitrozemí brachychiton skalní (*Brachychiton rupestris*, obr. 5). Jejich schopnost třepotavého pohybu je patrně spojena s nutností odvést nadbytek radičního tepla ze slunečních paprsků konvekci do okolního vzduchu, a snížit tím teplotu listové čepele. Listová čepel tak pohybem i v relativně klidném vzduchu snižuje tloušťku hraniční vrstvy nemíchaného vzduchu a usnadní přenos tepla ze svého „horkého“ povrchu do okolního chladnějšího vzduchu.

Souhrn předchozího ukazuje, že listová čepel i řapík, který ji spojuje se stonkem, jejich morfologie i anatomie byly po stovky milionů let předmětem evoluční „optimalizace“, jejímž cílem, jak se domníváme od doby Charlese Darwina, bylo zvýšit pravděpodobnost přežití a fitness, tedy reprodukční úspěch rostliny a vývoj nového druhu. Rychlost větru, intenzita slunečního záření, energetická bilance a výsledná převažující teplota listu byly hlavními fyzikálními faktory, které testovaly vhodnost evolučních inovací v daném prostředí. K nejvýznamnějším jistě patří změny ve velikosti a členitosti listové čepele, v utváření povrchu listu,



např. tvaru a četnosti trichomů, ale i tloušťce a složení kutikuly – voskového povrchu pokožkových buněk, v četnosti a velikosti průduchů a způsobu jejich chování, v délce a torzních i ohybových vlastnostech řapíku, ale také např. v aerodynamických vlastnostech porostu jedinců stejného druhu. Vítr má zásadní význam pro výměnu látek, hlavně vody a  $\text{CO}_2$ , i pro přenos energie a hybnosti mezi listem a volnou atmosférou. Globální změny v rychlosti větru spojené pravděpodobně se změnou klimatu proto

mohou negativně ovlivnit účinnost využití vody rostlinou a porostem a negovat převážně pozitivní změnu účinnosti způsobenou antropogenním růstem koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře Země. Přestože současné znalosti o vlivu větru na výpar z mokřých povrchů jsou podrobné, jeho vliv na výpar z listu a na rychlost asimilace uhlíku stále neznáme do detailů, a proto přináší i dnes nové a překvapivé poznatky.

Použitá literatura uvedena na webu Živý.