

FOTOSYNTÉZA

KRITICKÝ
KATALOG
VÝSTAVY

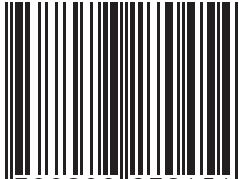
Markéta Ballová
Mařta Krusberská
Jan Prchal
Dominika Švédová
Marie Voldřichová



NÁRODNÍ
ZEMĚDĚLSKÉ
MUZEUM



ISBN 978-80-88270-45-4



9 788088 270454

FOTOSYNTÉZA

KRITICKÝ KATALOG VÝSTAVY

KATALOGIZACE V KNIZE - NÁRODNÍ KNIHOVNA ČR

Ballová, Markéta

Fotosyntéza : kritický katalog výstavy / Markéta Ballová, Marta Krusberská, Jan Prchal, Dominika Švédová, Marie Voldřichová. -- Vydání první. -- Praha : Národní zemědělské muzeum, 2024. -- 87 stran : ilustrace

Anglické resumé

Obsahuje bibliografii a bibliografické odkazy

ISBN 978-80-88270-45-4 (brožováno)

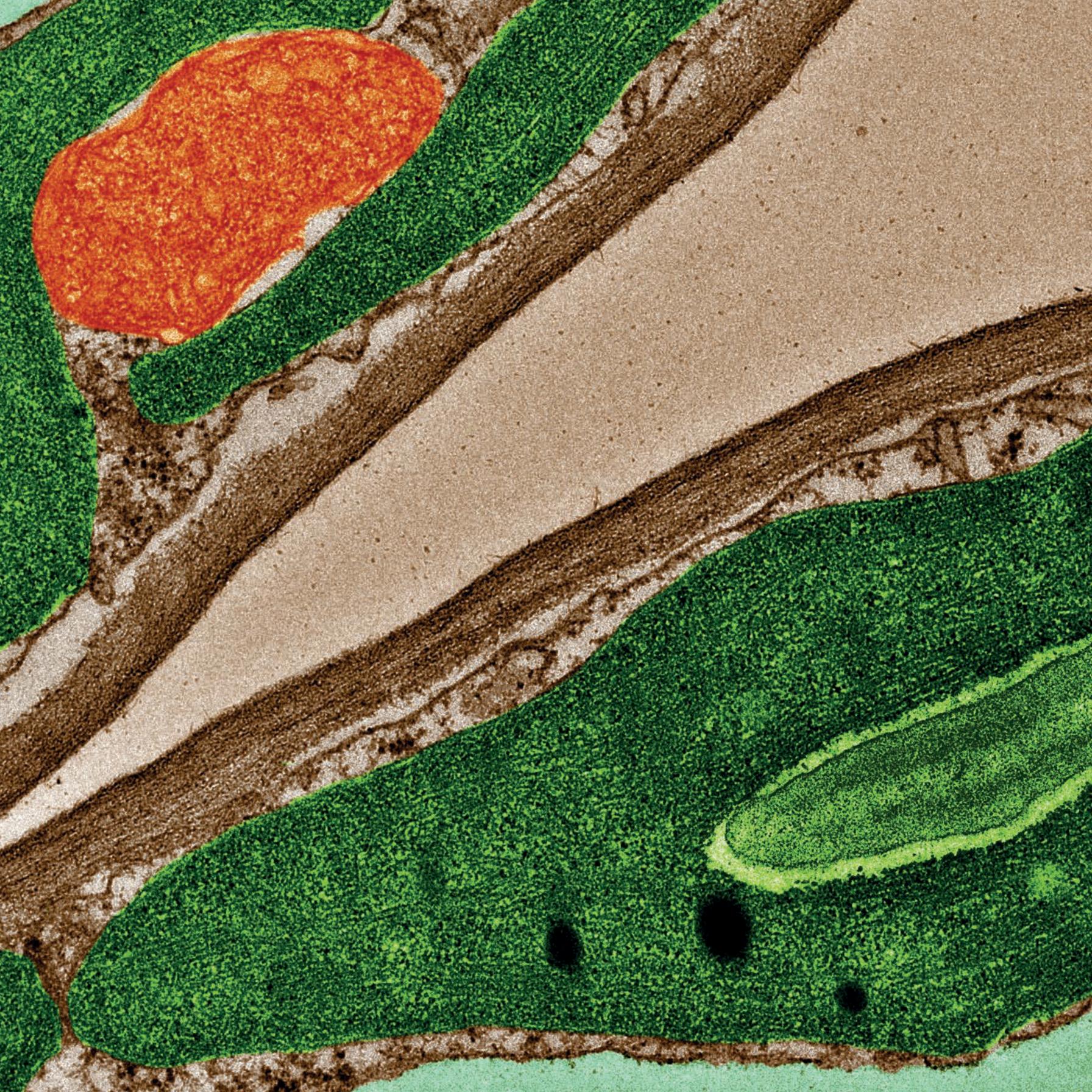
* 581.132 * 574.4 * 577.1-027.22 * 633 * (083.824)

- fotosyntéza
- koloběh prvků
- aplikovaná biochemie
- rostlinná výroba
- katalogy výstav

581 - Obecná botanika [2]



NÁRODNÍ
ZEMĚDĚLSKÉ
MUZEUM





Zelené plíce. Řez listem vysokohorské keřovité kopretiny *Ajania fruticulosa* na transmisním elektronovém mikroskopu. Zelená barva označuje chloroplasty, oranžová multivezikulární tělíska (autoři fotografie: Ivo Šauman, Alexey Bondar, Biologické centrum AV ČR)



FOTOSYNTÉZA

MARKÉTA BALLOVÁ

MARTA KRUSBERSKÁ

JAN PRCHAL

DOMINIKA ŠVÉDOVÁ

MARIE VOLDŘICHOVÁ



**NÁRODNÍ
ZEMĚDĚLSKÉ
MUZEUM**

1. ÚVOD

1.1 Úvodní slovo generálního ředitele

Vážené čtenářky, vážení čtenáři, milé návštěvnice, milí návštěvníci, dostává se vám do rukou katalog výstavy FOTOSYNTÉZA, výstavy zcela ojedinělé a výjimečné, výstavy, která chce v současném světě českého a evropského blahobytu upozornit na klíčový proces, který je tak zásadně významný, že jej bereme jako samozřejmost. On přirozeně samozřejmý je, protože bez něj byste nemohli číst tento katalog, nebylo by na čem jej vytisknout, nemohli byste dýchat, nebylo by co jíst atd. atd. a ještě jednou atd. O tom všem atd. se dočtete dále a dověděli jste se i na výstavě.

Co už tak samozřejmé není, a proto si zaslouží naši úctu, je práce s „ochočenou fotosyntézou a jejími produkty“, totiž práce zemědělců, lesníků, potravinářů a dalších dobrých hospodářů.¹ S plody jejich práce se denně setkáváme v obchodech a restauracích, ale při práci je vidíme čím dál méně.

Jak vlastně výstava vznikla? Když jsem se v roce 2020 vrátil do Národního zemědělského muzea a navštívil jsem nově vznikající pobočku v Ostravě-Vítkovicích, nemohl jsem opominout setkání s naším významným sousedem, panem Janem Světlíkem. Při příjemném rozhovoru, kdy jsme vzpomínali na naši dřívější spolupráci, se mne zeptal: „Proč neuděláte výstavu o fotosyntéze?“ No, proč vlastně ne? Při návštěvě předsedkyně Akademie věd České republiky paní Evy Zažímalové, vynikající biochemičky, jsem si ověřil, že proces fotosyntézy je stále zahalen tajemstvím. Věda jej umí popsat, ale neumí ho zopakovat. Nikdo tedy neví, jak tento všude- a všudypřítomný zázrak probíhá.

Od roku 2020 probíhaly v muzeu diskuze o tom, jak tak rozsáhlé a bohaté téma uchopit. Vyzkoušeli jsme si koordinovanou celomuzejní výstavu věnovanou odkazu Gregora Johanna Mendela při 200. výročí jeho narození v roce 2022 a následně, v roce 2023, jsem jmenoval pracovní tým k zajištění úkolů spojených s přípravou a realizací výstavy Fotosyntéza v roce 2024. Vedoucí pracovního týmu se stala paní Marie Voldřichová. Jeho členy byli Pavel Douša, Lucie Kubásková, Jan Prchal, Markéta Ballová, Dominika Švédová, Marta Krusberská,

Kateřina Čapounová, Alžběta Mandelová, Kateřina Závodová, Jitka Taussiková, Lenka Dlabolová a Josef Praks. Pracovní tým dovedl rozsáhlé a bohaté téma fotosyntézy do podoby výstavy a vytvořil tento katalog. Za to mu patří můj obdiv a veliké poděkování. Dále děkuji zejména Janu Světlíkovi za nápad, odborníkům ze Zahradnické fakulty Mendelovy univerzity v Brně, Fakulty strojní Českého vysokého učení technického, laboratoři mikroskopie a histologie Biologického centra AV ČR v Českých Budějovicích a Ústavu výzkumu globální změny AV ČR za spolupráci při tvorbě odborných textů i náplně expozice, Národnímu muzeu, Ostravskému muzeu a Václavu Krpešovi za zapůjčení předmětů do expozice, Danielu Dvořákovi za architektonické ztvárnění expozice, firmě CNC studio za její stavbu a uvedení do provozu.

Zřizovateli Národního zemědělského muzea, Ministerstvu zemědělství, děkuji za setrvalou podporu činnosti muzea a Ministerstvu kultury za finanční podporu této výstavy.

Věřím, vážené čtenářky, vážení čtenáři, milé návštěvnice, milí návštěvníci, že vás návštěva výstavy obohatila a tento katalog vám ji bude připomínat.

1.2 Proč se zabývat fenoménem fotosyntézy

Fotosyntéza (z řeckého *fós, fótos* – „světlo“ a *synthesis* – „shrnutí“, „skládání“) je fotochemický či též biochemický proces, při kterém se přijatá energie slunečního záření mění na energii chemických vazeb. Energie Slunce je využita k tvorbě energeticky bohatých cukrů z jednoduchých anorganických látek, oxidu uhličitého a vody, přičemž je uvolňován kyslík jako vedlejší produkt.² Fotosyntéza probíhá zejména v buňkách zelených rostlin, řas a bakterií (sinice).

Základní princip fotosyntézy byl poprvé popsán v 70. letech 18. století Josephem Priestleyem a Janem Ingenhouszem. Chemickou podstatu reakce objevili Melvin Calvin, James Bassham a Andrew Benson v roce 1950. Dodnes však nejsou známy všech-

¹ Protože jsme v Národním zemědělském muzeu, vyjmenovávám pouze dílčí profese, které patří do jeho působnosti. Kdybych měl vyjmenovat všechny profese, které tak či onak pracují s produkty fotosyntézy, vyplnil bych celý katalog. Ani Michelangelo by nemohl vytesat Davida, nebýt vápence přeměněného v mramor.

² VODRÁŽKA, Zdeněk, Biochemie 3, Praha 1993, s. 56, 65.

³ MARSHALL, Michael, Photosynthesis is still a mystery – but science is revealing unknown steps, National Geographic, 15. 5. 2023, dostupné online na: <<https://www.nationalgeographic.com/premium/article/photosynthesis-still-a-mystery-science-revealing-unknown-steps>> [15. 4. 2024].

ny aspekty procesu. Fotosyntéza tak v jistém ohledu nadále zůstává tajemstvím přírody,³ kterým se zabývá mnoho vědních oborů.⁴ Výzkumu fotosyntézy jsou mimo jiné plně dedikovány dva odborné vědecké časopisy – Photosynthetica a Photosynthetic Research a mezinárodní vědecké uskupení International Society of Photosynthetic Research.

Není nijak přehnané, pokud fotosyntézu označíme za jeden z nejdůležitějších přírodních dějů našeho světa a za základ veškerého života na Zemi. Tento tři a půl miliardy let starý vynález bakterií, řas a rostlin umožňuje organismům získávat potravu (včetně produkce potravin pro lidstvo), dýchat a žít. Fotosyntéza přímo formuje podobu našeho světa. Díky fotosyntéze existuje kyslík a ochranná ozonová vrstva v atmosféře, a náš svět je zelený. Fotosyntéza se podílí na koloběhu životně důležitých prvků a fungování nekonečného množství reakcí mezi živou i neživou hmotou přírody, jako jsou například erozní a horotvorné procesy.

Na efektivitě fotosyntézy závisí výnosy v zemědělství, které musí pokrýt potřeby stále rostoucí lidské populace. Fotosyntéza může být rovněž využita k ochraně půd a v boji proti důsledkům změn klimatu. Probíhají též pokusy o umělou replikaci procesu fotosyntézy, která by měla umožnit průmyslovou výrobu surovin, včetně paliv a léčiv na základě obnovitelných zdrojů. Z těchto důvodů je v současnosti jedním z nejintenzivněji zkoumaných procesů s řadou projektů zaměřených na modifikaci, zvýšení efektivity a využití fotosyntézy v zemědělství, ochraně přírody i průmyslu. Období rozkvětu zažívá celý vědní obor orientovaný na výše zmíněnou „umělou či industriální fotosyntézu“, která je považována za „technologii snů“.

1.3 Stav řešení problematiky – fotosyntéza jako námět výstavy

Přes nespornou důležitost nebyla fotosyntéze v recentní době věnována žádná samostatná monotematická výstava v Česku ani v anglofonním, německém či ruskojazyčném prostředí. Do sou-

vislosti s fotosyntézou je možné dát pouze výstavy věnované rostlinám ve funkci producentů, jako je expozice Plants: Friends Supporting the Earth z roku 2021, uspořádaná japonským muzeem National Science Museum v Tokiu.

Zatímco prezentace fotosyntézy jako hlavního tématu odborných muzejních výstav je minimální, je paradoxně velmi častým námětem uměleckých expozic v Česku i v zahraničí (např. Portrait of photosynthesis, The Royal institution, 2015, Markéta Skalková: Photosynthesis, Loster, 2021, Invisible Forces, Kunsthalles Praha, 2022, Keiichi Tahara: Fotosyntéza 1978–1980, Národní galerie Praha, 2017, atd.) a popularizačních přednášek pro širokou veřejnost (např. Věda pro veřejnost: Fotosyntéza – naše minulost, přítomnost, budoucnost, Mikrobiologický ústav AV ČR, 26. ledna 2022). Po zadání hesla „fotosyntéza“ na platformě YouTube se např. zobrazí více než padesát popularizačních videí v českém jazyce.⁵



Pohled do expozice výstavy Život ve vzduchu, Osvícená fotosyntéza v NZM Kačina (autor fotografie: Jan Prchal)

4 Například stavbu a funkci proteinových komplexů viz LAIBLE, Philip, D. – HANSON, Deborah, K. – BUHRMASTER, James et al., Switching sides – Reengineered primary charge separation in the bacterial photosynthetic reaction center, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117 (2), s. 865; či chemickou podstatu vzniku O_2 viz BHOWMICK, Asmit – HUSSEIN, Rana – BOGACZ, Isabel et al., Structural evidence for intermediates during O_2 formation in photosystem II., Nature 2023, 617, s. 629–636.

5 Kanál YouTube. Dostupné online na: <https://www.youtube.com/results?search_query=fotosynt%C3%A9za> [15. 4. 2024].

[illegible]

10

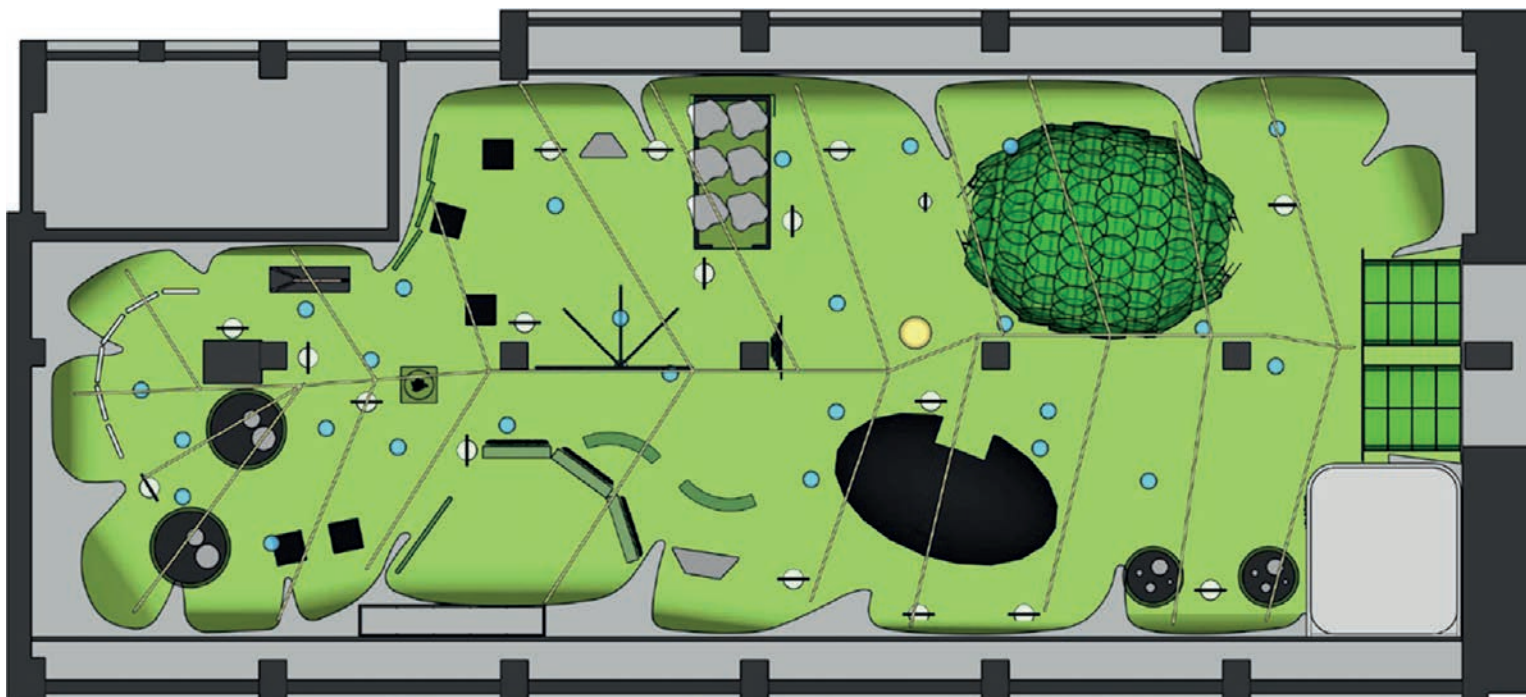
Zpracování půdy – koloběh živin –
FOTOSYNTÉZA
20.4. – 20.10.2019

NÁRODNÍ ZEMĚDĚLSKÉ
MUZEUM
(ČASÍLAV)

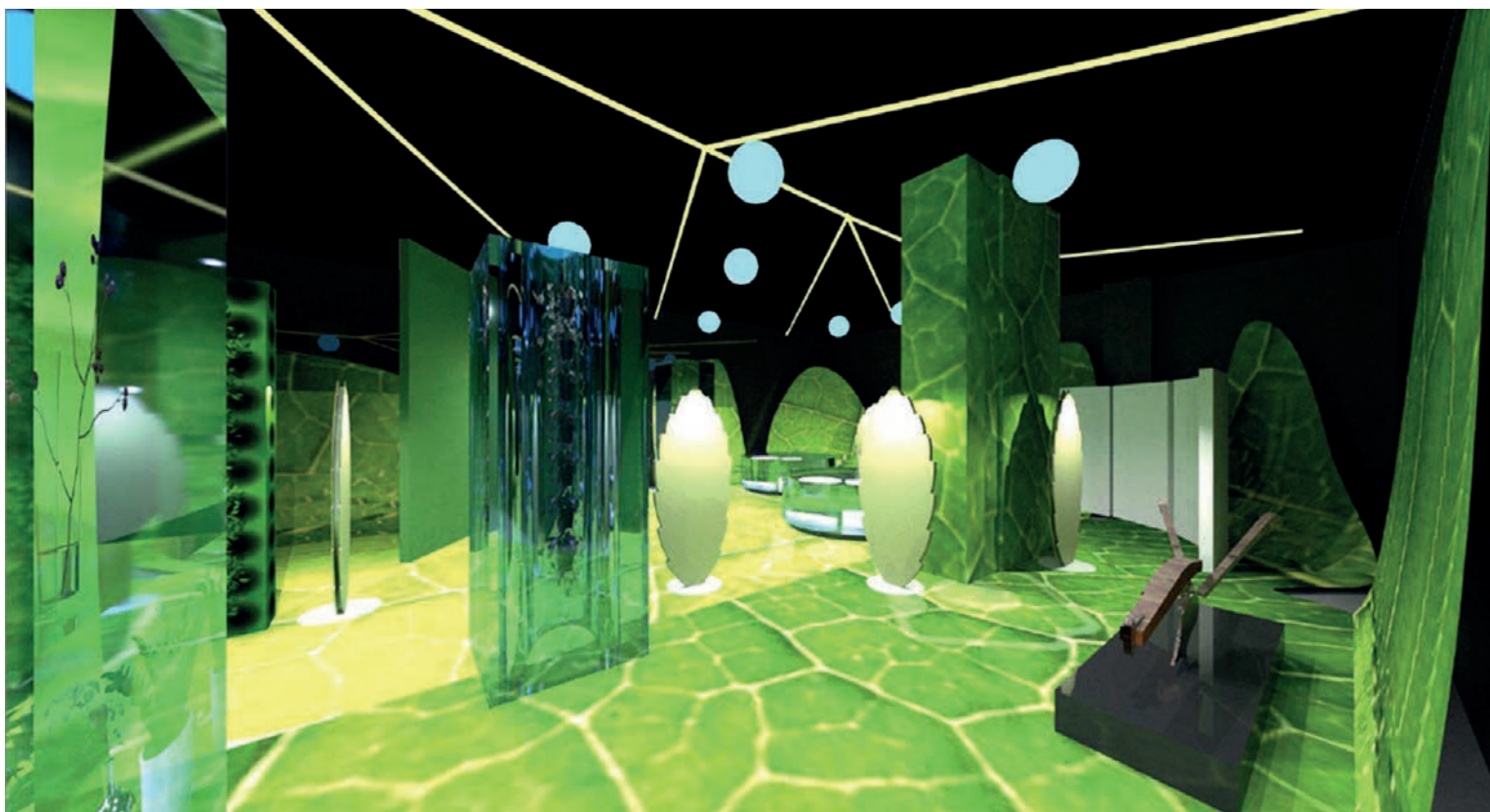
*Pohled do expozice výstavy Zpracování půdy a koloběh živin v NZM Čáslav
(autor fotografie: Markéta Ballová)*

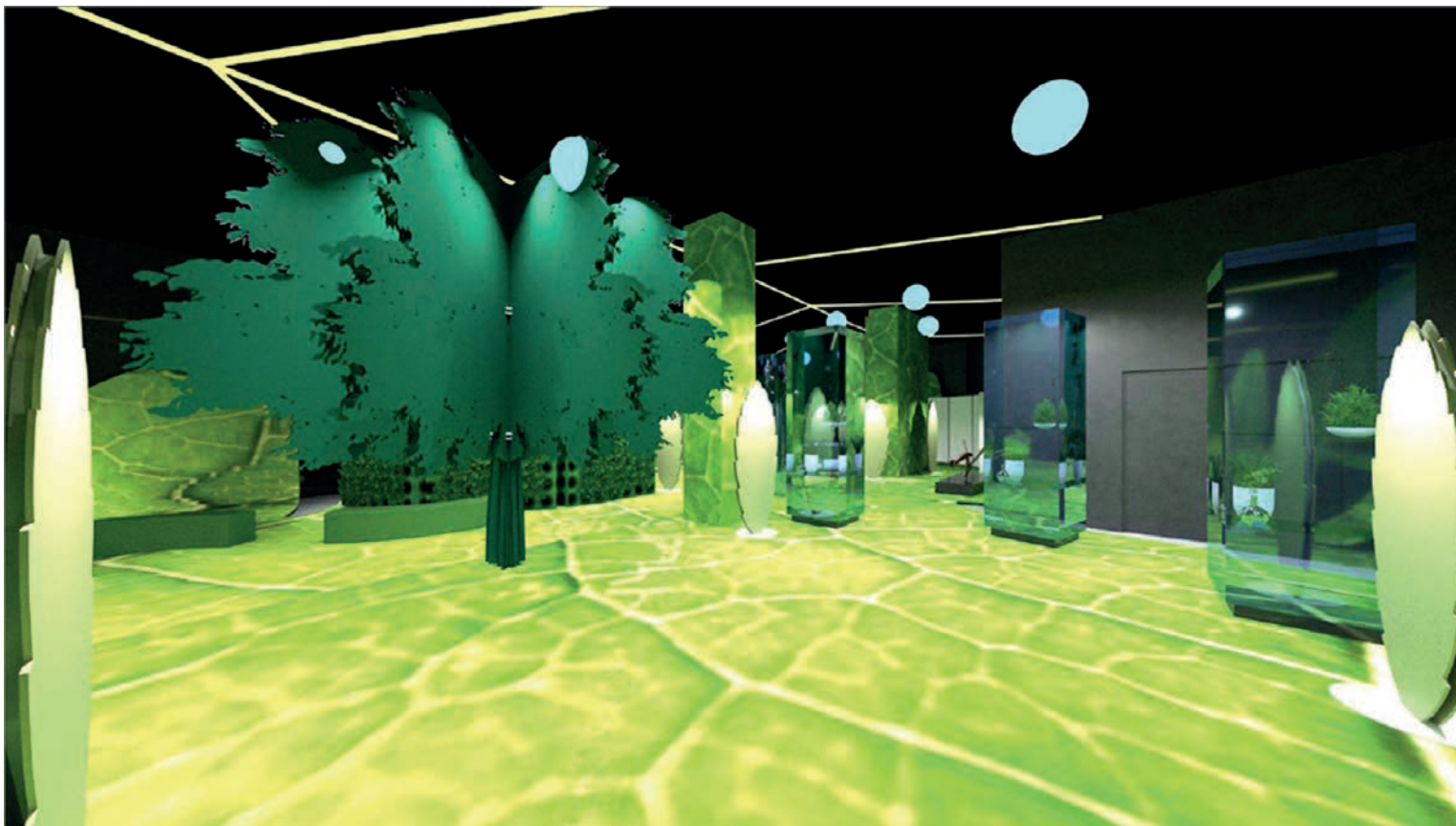


*Pohled do expozice výstavy Černá fotosyntéza v NZM Ostrava
(autor fotografie: Marta Krusberská)*



Návrh půdorysu expozice Fotosyntéza (zdroj: DVOŘÁK, Daniel – KUT, Karel, Fotosyntéza, studie – prováděcí projekt výstavy, 26. 5. 2024, s. 16; uložení: fond NZM Praha)





Vizualizace expozice Fotosyntéza (zdroj: DVORÁK, Daniel – KUT, Karel, Fotosyntéza, studie – prováděcí projekt výstavy, 26. 5. 2024, s. 10–11; uložení: fond NZM Praha)

1.4 Stručné představení souboru výstav na téma fotosyntéza v NZM Praha

Příprava výstavy Fotosyntéza započala v průběhu roku 2023 shromažďováním relevantních podkladů, realizace a otevření výstavy se uskutečnily v průběhu roku 2024 ve všech pobočkách Národního zemědělského muzea. Hlavní výstavu v NZM Praha doplňují dílčí, prostorově méně rozsáhlé výstavy na jednotlivých pobočkách Národního zemědělského muzea, konkrétně NZM Čáslav, NZM Kačina, NZM Ohrada, NZM Ostrava a NZM Valtice. Tyto výstavy slouží k populárně edukačnímu účelu stejně jako hlavní expozice a dále jako upoutávka na hlavní výstavu v NZM Praha. Jejich tematické zaměření odráží specializaci jednotlivých poboček. Výstava tak probíhá v celém Národním zemědělském muzeu jako takovém prostřednictvím šesti výstav:

● **NZM Praha:** Hlavní expozice o celkové ploše 600 m² je umístěna ve výstavním sálu NZM Praha, Kostelní 1300/44. Termín konání výstavy: 5. 12. 2024 – 31. 12. 2025. Podrobněji k výstavě viz podkapitola 1.4.1, Charakteristika výstavy Fotosyntéza v NZM Praha.

● **NZM Čáslav:** Výstava zpracování půdy a koloběh živin, realizovaná formou animované projekce a ukázkami modelů zemědělských strojů, návštěvníkům ilustruje, jak různé metody obdělávání půdy ovlivňují schopnost rostlin využívat sluneční energii pro jejich růst a vývoj. Nosným tématem je vliv agrotechnických postupů na koloběh živin a jeho souvislost s fotosyntézou. Termín konání výstavy: 21. 6. – 31. 10. 2024.

● **NZM Kačina:** Výstava Život ve vzduchu s podtitulem Osvícená fotosyntéza se zaměřuje na osobnost jednoho z objevitelů fotosyntézy, holandského lékaře a přírodovědce Jana Ingenhousze, a na pokroky v biologii. Termín konání výstavy: 21. 6. – 31. 12. 2024.

● **NZM Ohrada:** Výstava Stromy. Lesy. Klima.cz se věnuje různým aspektům fascinujícího procesu fotosyntézy, který souvisí s lesem, jeho funkcemi a řízenou obnovou v rámci lesního hospodářství. Termín konání výstavy: 1. 4. – 31. 10. 2024.

● **NZM Ostrava:** Náplní výstavy Černá fotosyntéza je černé uhlí, kvůli kterému získala Ostrava přezdívku „černé srdce Česka“. Černé

uhlí vzniklo díky fotosyntéze a je to v podstatě uskladněná energie, kterou rostliny získaly ze Slunce. Výstava seznamuje diváky s podobou prvohorního tropického pralesa a prehistorických rostlin, které díky fotosyntéze určily podobu dnešního světa. Termín konání výstavy: 24. 6. – 30. 9. 2024.

● **NZM Valtice:** Výstava Zázrak jménem fotosyntéza odhaluje, jak rostliny přeměňují světlo, vodu a oxid uhličitý na energii nabitý cukr a životadárny kyslík. Termín konání výstavy: 4. 4. – 31. 10. 2024.

1.4.1 Charakteristika výstavy Fotosyntéza v NZM Praha

Námětem výstavy v NZM Praha je fotosyntéza nahlížená v několika úrovních: jako fotochemická reakce, jako jeden z hlavních procesů formujících podobu planety a jedna ze základních podmínek života (zdroj kyslíku, potravy...), ale opomenut není ani její přesah do lidské kultury. Největší objev v dějinách lidstva – zemědělství – je základem produkce potravin a průmyslových surovin a v přímé návaznosti i katalyzátorem společenských změn.

Páteří výstavy jsou atraktivní velkoplošné instalace doplněné předměty různé povahy (modely, sbírkové předměty) s vysvětlujícími texty v českém a anglickém jazyce a audiovizuálními a interaktivními prvky. Součástí expozice je rovněž prostor pro edukační programy pro I. a II. stupeň základních škol a workshopy pro stejnou věkovou kategorii v prostorách muzea. Výstavu doprovází volný cyklus přednášek pod zastřešujícím tématem fotosyntézy.

Struktura výstavy je tematicky velmi pestrá a umožní návštěvníkům nahlédnout do tajů fotosyntézy – pouhým okem neviditelného a přesto všudypřítomného procesu, který určuje podobu a existenci našeho světa, často v nečekaných souvislostech. Výstava má edukační potenciál pro všechny věkové kategorie návštěvníků, včetně dětí. Spojuje esteticky poutavé instalace s poučením a umožňuje návštěvníkům vlastní experimentování – využití nabytých znalostí. Základním principem instalace je atraktivita a srozumitelnost. Cílem je umožnit návštěvníkovi pochopit základní pojmy a principy procesu fotosyntézy, nahlédnout tento jev z různých aspektů a uvědomit si jeho všudypřítomný vliv na podobu našeho světa, aniž by byl přesyten informacemi.

Výstava je koncipována do pěti primárních tematických okruhů, kdy prvním zastavením je vysvětlení pojmu fotosyntéza. Od

nejjednodušších fotosyntetizujících buněk (bakterií) se návštěvník po pochopení základních pojmů přesune k širším souvislostem v rámci jednotlivých zastavení výstavy. Každý z oddílů výstavy je charakterizován jedním dominantním objektem. Jednotlivé tematické okruhy jsou blíže specifikovány níže:

1) Seznamte se, fotosyntéza

Tento oddíl výstavy je zasazen do průchozího stylizovaného modelu chloroplastu, který je zároveň ústředním prvkem celého oddílu. Model obsahuje interaktivní prvky a exponáty, které mají za cíl seznámit návštěvníka se základními pojmy, jejichž pochopení je nezbytné pro porozumění procesu fotosyntézy.

2) Fotosyntéza utváří náš svět

Centrálním prvkem je demonstrace produkce kyslíku rostlinami, jejich vlivu na atmosféru a dystopické dioráma ukazující podobu světa bez rostlinstva, a tedy i fotosyntézy. Návštěvníci prostřednictvím exponátů a interaktivních prvků zjistí, že fotosyntéza je všudypřítomná a vytváří podobu našeho světa.

3) Fotosyntéza ve službách člověka

Centrálním prvkem jsou tři modely fotobioreaktorů řízených umělou inteligencí (AI), jakožto moderní alternativa ke kultivaci plodin. Fotosyntéza je základem zemědělství, a tím i základem produkce potravin a dalších surovin. Může být rovněž využita jako tzv. zelený či obnovitelný zdroj, ačkoliv její užití je v této fázi spíše experimentální.

4) Fotosyntéza mnoha tváří

Oddíl výstavy zaměřený primárně na vizuální složku, jeho centrálním prvkem je instalace „Strom života“. Poskytuje návštěvníkům uklidnění a odpočinek od předchozích vědeckých a technických informací. Expozice má za cíl evokovat emoce na základě vizuálních podnětů a přimět k zamyšlení.

5) Kino budoucnosti

Série krátkých naučných filmů přibližuje návštěvníkům zábavnou formou základní fakta o fotosyntéze.

Výstavu doplňují edukační programy a kritický katalog v českém a anglickém jazyce.

2. METODIKA

Výstava Fotosyntéza i text kritického katalogu si v důsledku širokého záběru zkoumané problematiky vyžádaly užití poznatků z řady vědních oborů přírodovědného, společenskovědního i technického okruhu. Základem obsahu výstavy i kritického katalogu byly poznatky získané spoluprací s odborníky na danou tematiku a rešerší odborných pramenů. Při tvorbě expozičních textů byly dále využity metody výkladu a narace, v případě historických osobností spjatých s výzkumem fotosyntézy též biografická metoda.

Text kritického katalogu je primárně zaměřen na oxygenní (kyslík produkující) fotosyntézu, která je nejrozšířenějším a nejvýznamnějším typem fotosyntézy. Ostatní druhy fotosyntézy jsou pouze zmíněny a nejsou pojednány do hloubky. V logické návaznosti na tuto skutečnost se texty dále věnují nejrozšířenějším organismům, které oxygenní fotosyntézu využívají, tedy sinicím a zeleným rostlinám.

Katalog svou základní strukturou odpovídá konceptu a prostorovému řešení výstavy. V jistém ohledu tak může být použit též jako odborný průvodce expozicí. Lze jej volně rozdělit do čtyř základních okruhů: 1) základní seznámení s podstatou fotosyntézy jako biochemického děje, její vznik a vývoj (v katalogu kapitola 3, Seznamte se, fotosyntéza); 2) způsob a rozsah působení fotosyntézy na planetu Zemi (v katalogu kapitola 4, Fotosyntéza utváří náš svět); 3) přímé využití fotosyntézy člověkem (v katalogu kapitola 5, Fotosyntéza ve službách člověka); 4) zajímavé aspekty fotosyntézy (v katalogu kapitola 6, Fotosyntéza mnoha tváří).

Text byl sestaven na základě rešerší publikované české a cizojazyčné odborné literatury a dále původního výzkumu členů autorského týmu, který je publikován v podkapitole 4.2.3, Moderní pěstební metody – smart agriculture, a podkapitole 5.3.2, Fotobioreaktory pro kultivaci mikrořas.

Podkapitola Atmosféra byla vypracována s odborným příspěvím RNDr. Ing. Jaroslava Rožnovského, CSc., ze Zahradnické fakulty Mendelovy univerzity v Brně. Podkapitola Moderní pěstební metody – smart agriculture byla vypracována ve spolupráci se Zahradnickou fakultou Mendelovy univerzity v Brně, autorem textu je prof. Ing. Robert Pokluda, Ph.D.⁶ Podkapitola Fotobioreaktory pro kultivaci mikrořas byla sepsána ve spolupráci

6 Zahradnická fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Valtická 337, 691 44 Lednice, robert.pokluda@mendelu.cz.

s Ústavem procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní Českého vysokého učení technického, autory textu jsou Ing. Mgr. Vojtěch Bělohav, Ph.D., a prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.⁷ Obě podkapitoly se zabývají moderními způsoby kultivace plodin, a to tradičními i moderními (řasy).

Cílem autorů je seznámit čtenáře s fenoménem fotosyntézy tak, aby pochopili její základní principy jako biochemického procesu a následně její široký, takřka všudypřítomný vliv na planetu Zemi a lidstvo.

3. SEZNAMTE SE, FOTOSYNTÉZA

3.1 Co je to fotosyntéza?

Zákon zachování energie stanoví, že energie nemůže být vytvořena ani zničena, může se pouze přeměňovat z jedné formy na jinou. Fotosyntéza je biochemický proces, jehož prostřednictvím organismy převádějí světelnou energii na energii chemickou.

3.1.1 Fotosyntéza jako chemický děj

Fotosyntéz existuje hned několik druhů, například některé fotosyntetizující bakterie využívají sirovodík (H_2S) jako zdroj elektronů místo vody a produkují síru. Tyto fotosyntézy jsou anoxygenní, to znamená, že neprodukují kyslík.⁸ Nejrozšířenější a nejvýznamnější je nicméně fotosyntéza oxygenní (kyslík produkující),⁹ na kterou se zaměříme.

V případě oxygenní fotosyntézy využívají zelené rostliny a některé mikroorganismy sluneční záření, vodu (H_2O) a oxid uhličitý (CO_2) k výrobě energie v podobě cukru. Část kyslíku je z reakce uvolňována jako vedlejší produkt. Cukr získaný procesem fotosyntézy představuje energetický zisk pro metabolismus organismů, a tedy jejich růst. Rovněž zásobuje atmosféru kyslíkem, který je nezbytný pro život lidí, zvířat i samotných rostlin.

Nelze samozřejmě opominout, že i rostliny potřebují energii z vlastních rezerv, a tedy že i rostlina dýchá (redukuje kyslík) a produkuje oxid uhličitý, ale poměr produkce kyslíku převládá nad jeho spotřebou.

Výměna plynů, tedy příjem oxidu uhličitého pro fotosyntézu (a jeho výdej při dýchání), výdej kyslíku (a jeho příjem při dýchání) a také výdej vody odparem, se u rostlin děje prostřednictvím tzv. průduchů,¹⁰ které se vzhledem ke své funkci označují jako provětrávací pletiva.

Průduch tvoří dvě svěrací buňky, mezi nimiž je průduchová šterbina. Ta se při nedostatku vody zavírá, aby rostlina zbytečně neztrácela vodu. Průduchy dosahují délky $10\text{--}80\text{ }\mu\text{m}$ ¹¹ (u evolučně starších rostlin až cca $100\text{ }\mu\text{m}$), u většiny suchozemských rostlin jsou umístěny na spodní straně listu, u rostlin s listy plovoucími na hladině naopak na svrchní straně. U ponořených rostlin chybí a výměna plynů probíhá přes celý povrch rostliny. Odhaduje se, že ročně projde rostlinnými průduchy 120×10^{15} gramů uhlíku a v tropických lesích rostliny přes průduchy každý půlrok „recyklují“ celkový objem vody v atmosféře (ročně jimi projde 32×10^{15} kg vodní páry, což je cca dvojnásobek obsahu vodní páry v atmosféře, který činí 15×10^{15} kg).¹²

Průběh fotosyntézy lze zjednodušeně zapsat pomocí rovnice:



Tato rovnice se však často zjednodušuje na:



Fotosyntéza probíhá ve dvou fázích – světelné a temnostní, viz následující diagram:

Světelná fáze



Podstatou je štěpení vody na světlo

Proces se nazývá fotolýza vody nebo také Hillova reakce dle R. Hilla

Poskytuje elektrony a vodíkové kationty pro tvorbu ATP a NADPH+H⁺

Temnostní fáze



Podstatou je fixace a redukce CO_2 a tvorba sacharidů, primárně glukózy

⁷ Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze, Technická 4, 160 00, Praha 4, vojtech.belohlav@fs.cvut.cz, +420 724 700 472.

Světelná fáze fotosyntézy probíhá v thylakoidních membránách chloroplastů, zde světlo absorbují fotosyntetické pigmenty. Pigmenty následně generují energii pro vytvoření ATP a NADH, což jsou základní látky pro temnostní fázi fotosyntézy. Světelné fáze se účastní tři bílkovinné systémy: fotosystém I, komplex cytochromů b6/f a fotosystém II.

Během temnostní fáze jsou produkty světelné fáze (ATP¹³ a NADH¹⁴) využity k fixaci oxidu uhličitého a k jeho přeměně na organické sloučeniny. V současné době známe tři cykly fixace oxidu uhličitého: Calvinův, Hatch-Slackův a CAM cyklus.

Ribulóza-1,5-bisfosfát-karboxyláza/oxygenáza, zkráceně RuBisCO, je enzym, který hraje zásadní roli ve fotosyntéze, konkrétně v procesu, při kterém rostliny přeměňují oxid uhličitý z atmosféry na cukry. Tento enzym je nejrozšířenější protein na planetě Zemi a je klíčovou součástí Calvinova cyklu, který probíhá v temnostní fázi fotosyntézy.

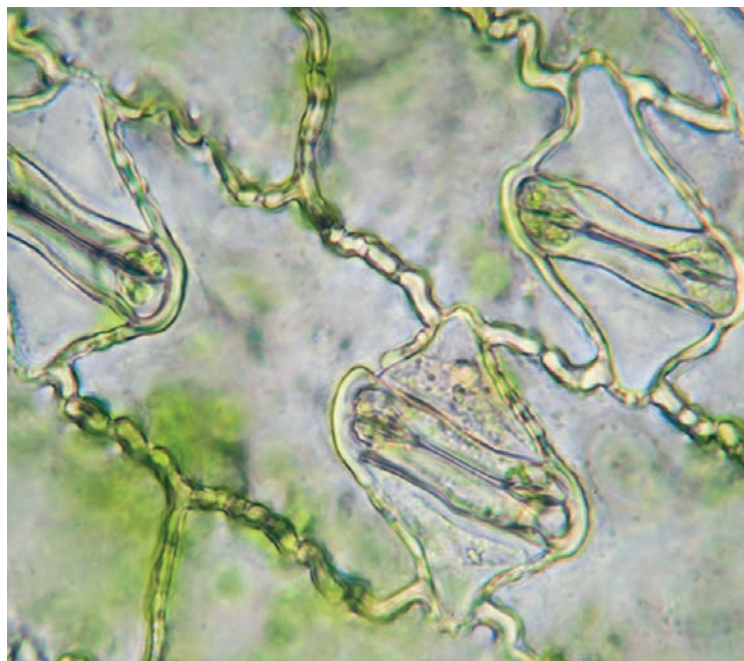
RuBisCO má schopnost připojit oxid uhličitý k molekule zvané ribulóza-1,5-bisfosfát (RuBP), což je první krok v přeměně oxidu uhličitého na organické látky, jako jsou cukry, které rostliny využívají k růstu. I když je RuBisCO velmi efektivní při práci s oxidem uhličitým, může také reagovat s kyslíkem, což vede k procesu zvanému fotorespirace, při kterém se ztrácí energie a snižuje se účinnost fotosyntézy.

Je zajímavé, že RuBisCO upřednostňuje lehčí formu uhlíku (¹²C) před těžší (¹³C), což ovlivňuje složení organických sloučenin, které rostliny vytvářejí. Tento enzym je tedy klíčový nejen pro samotnou fotosyntézu, ale i pro to, jak rostliny využívají a ukládají uhlík.

Organismy schopné využívat sluneční energii k pohonu vlastních buněk se nazývají autotrofní. Naopak organismy, které získávají energii a živiny tím, že konzumují jiné organismy nebo je-

jich produkty, se označují jako heterotrofní. Mezi tzv. autotrofy řadíme zelené rostliny, řasy, sinice, část bakterií a řadu dalších organismů.

Celý proces fotosyntézy probíhá v buňkách uvnitř buněčných organel zvaných chloroplasty, za pomoci fotosyntetických pigmentů. S chloroplasty i pigmenty se blíže seznámíme v dalších kapitolách.



Uzavřené průduchy v pokožce kukuřice seté (*Zea mays*)
(autor fotografie: Umberto Salvagnin; VisualHunt; C.C. BY-SA 2.0)

8 A aby to bylo ještě složitější, některé bakterie ze skupiny Archaea zachytávají pomocí proteinu světlo a využívají ho k získání energie, ale nefixují přitom uhlík (tudíž nesyntetizují organické látky), takže je nelze považovat za fotosyntetické, ale pouze za fototropické.

9 VÍTÁMVÁS, Pavel, Nová Botanika, 2020, 2, s. 39, dostupné online na: <http://www.novabotanika.eu/Vitamvas_NB2020_2.pdf> [10. 5. 2024].

10 Kromě průduchů může výměna plynů probíhat i v podzemních částech rostliny přes kořeny. Zde jsou průduchy přítomny jen vzácně a jejich roli plní tzv. aerenchym, který dovozuje přístup kyslíku a např. etylenu.

11 FRICKER, David, M. – WILLMER, Colin, Stomata, Londýn: 2012, s. 18.

12 HETHERINGTON, Alistair, M. – WOODWAER, Ian, F., The role of stomata in sensing and driving environmental change, Nature, 2003, 424, s. 901.

13 Adenosíntrifosfát je nukleotid představující jakousi zásobárnu energie. Při jeho štěpení dochází k uvolnění značného množství energie, která je využívána k velkému množství buněčných pochodů (např. syntéza RNA, biosyntéza složitých organických látek atd.), podrobněji viz např. Západočeská univerzita v Plzni, Role ATP v buňce, dostupné online na: <<https://kof.zcu.cz/vusc/pg/termo09/termodynamics/prilohy/e1.htm>> [6. 9. 2024]; Národní zdravotnický informační portál, dostupné online na: <<https://www.nzip.cz/rejstrikovy-pojem/2591>> [6. 9. 2024].

14 Nikotinamidadeninukleotid je koenzym, který ve fotosyntetické reakci pomáhá přeměnit oxid uhličitý na cukr, podrobněji viz LEDVINA, Miroslav – STOKLASOVÁ, Alena – CERMÁN, Jaroslav, Biochemie pro studující medicínu, I. a II. díl., Praha 2009, s. 85–90.

3.1.2 Fotosyntéza a světlo

Jak bylo uvedeno výše, fotosyntéza je sled reakcí poháněných světlem, které je jedním z klíčových faktorů tohoto děje a slouží rostlinám jako zdroj energie. Světlo je absorbováno fotopigmenty.

Světlo je forma elektromagnetického záření. Viditelné světlo je část elektromagnetického spektra, kterou lidské oko dokáže vnímat jako barvy. Toto spektrum zahrnuje světlo s vlnovými délkami přibližně od 380 nm do 750 nm.

Různé vlnové délky determinují barvy. Barva povrchu záleží na tom, které vlnové délky vstřebává a které odráží. List je tedy viděn jako zelený, protože chlorofyl obsažený v listech odráží nebo propouští (ale neabsorbuje) světlo v zelené části spektra. Světlo, které vidíme, je tak převážně zelené, což způsobuje, že chlorofyl a rostliny, které ho obsahují, vypadají zeleně.

Isaac Newton objasnil lom na optickém hranolu a vznik spektra v knize Optika vydané roku 1686, jemu je také tento objev připisován. Nicméně disperzi světla jako první popsal Jan Marcus Marci z Lanškrouna (1595–1667). Tento český profesor Karlovy univerzity, lékař, přírodovědec a matematik vysvětlil rozklad bílého světla ve svém díle O duze, které vyšlo v roce 1648, tedy ještě před studií vydanou Newtonem.¹⁵ Rozklad světla na jednotlivé barvy je dobře viditelný při průchodu bílého světla optickým hranolem. Optický hranol je průhledné těleso se dvěma stěnami, které lámou světlo. Při průchodu hranolem dochází k disperzi – bílé světlo se po průchodu hranolem rozloží na barevné složky, přičemž je pořadí barev vždy stejné.

Vyšší rostliny využívají viditelnou oblast slunečního záření, označovanou jako fotosynteticky účinné záření (FAR – photosynthetically active radiation). Jedná se o paprsky vlnové délky 380–760 nm,¹⁶ ale různými autory je popsána různě, např. 400–700 nm.¹⁷

Intenzita, spektrální složení a délka světelného dne ovlivňují rychlost a účinnost fotosyntézy. Minimální intenzita osvětlení, při

kteří může začínat proces fotosyntézy, je velmi nízká. Fotosyntéza některých rostlin začíná již při intenzitách petrolejové lampy. Řasy, které žijí v hloubkách, využívají osvětlení o intenzitě měsíčního světla. Obsah chlorofylu u jednotlivých druhů rostlin je rozdílný, difference souvisí s adaptací rostlin na světelné podmínky. Více zelených a žlutých pigmentů mají listy přizpůsobené nižším intenzitám světla. Nároky polních plodin na světlo jsou velmi různorodé, vyšší intenzitu potřebuje například kukuřice nebo slunečnice. Podle nároků na intenzitu světla rozlišujeme rostliny na světlomilné, stínomilné a indiferentní.¹⁸ Rostliny se dlouhodobě přizpůsobily podmínkám svého prostředí, což vedlo k modifikaci fotosyntézy – dle mechanismu fixace oxidu uhličitého rozlišujeme skupiny rostlin na C3, C4 a CAM.

Míra, kterou rostlina využívá světelnou energii k přeměně oxidu uhličitého a vody na organické látky, se označuje jako efektivita fotosyntézy. Vyjadřuje se jako poměr množství absorbované světelné energie a množství vyprodukované biomasy. Vzhledem k tomu, že rostliny neabsorbují veškeré dostupné sluneční světlo a nepřemění veškerou získanou energii na biomasu, je efektivita fotosyntézy rostlin poměrně malá.

V laboratorních podmínkách a při použití optimalizovaných světelných podmínek může efektivita fotosyntézy teoreticky dosáhnout přibližně 5–6 % využitelné energie světla.¹⁹ Intenzivně zavlažované a hnojené porosty dosahují během růstu jednoho, maximálně dvou procent, ale globální průměr je pouze 0,2 %.²⁰ S ohledem na obrovské množství slunečního záření dopadajícího na povrch Země je „neefektivita“ fotosyntézy v podstatě zanedbatelná a celkový výkon fotosyntézy je v globálním měřítku úžasný.²¹ Fotosyntéza zachycuje přibližně 100 terawattů (TW) sluneční energie ročně ve formě biomasy na pevnině.²² Tento objem energie je přibližně šestkrát větší než celková globální energetická poptávka lidstva za rok.²³ Další nesmírnou rezervu pro budoucnost, kdy snad lidstvo ovládne proces fotosyntézy, tvoří sluneční energie dosud nevyužitá rostlinstvem.

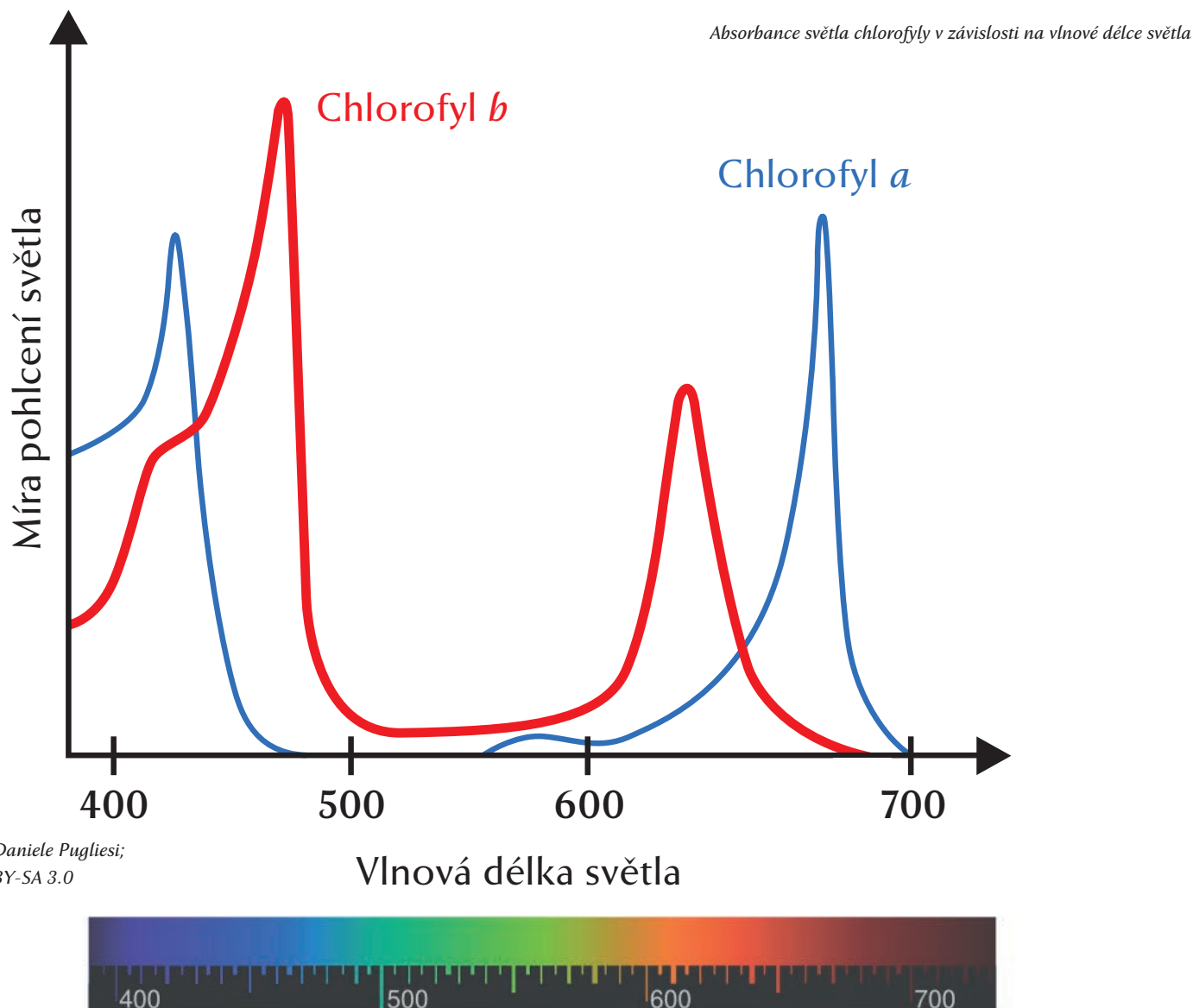
15 SCHEJBALOVÁ, Jana – ČERMÁKOVÁ, Milada, Balmerova série, Současné trendy vědy a moderních technologií, 2016–2017, přednáška, dostupné online na: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3A%2F%2Ffyzu3v.fjfi.cvut.cz%2Fcurrent%2Fweb%2Fprednasky%2F15-17ZaverecnePrace%2FBALME-ROVA_SERIE.pptx&wdOrigin=BROWSELINK> [15. 4. 2024].

16 HAGEMEI, Marc, Leaf and crown optical properties of five early-, mid- and late-successional temperate tree species and their relation to sapling light demand, Forests, 2019, 10(10), 925.

17 Hodnotu 400–700 nm udává např. GRANT, Richard, H., Partitioning of biologically active radiation in plant canopies, Personal perspectives, 1997, 40, s. 26–40.

18 ŠEBÁNEK, Jiří, et al., Fyziologie rostlin, Praha 1983, s. 161.

19 BLANKENSHIP, Robert, E. – TIEDE, David, M. – BARBER, James et al., Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement, Science 2011, 332(805), s. 806.



Modifikováno z Daniele Pugliesi;
Wikipedia ; CC BY-SA 3.0

20 BARBER, James, Biological solar energy, Philosophical transactions, series A, mathematical, physical and engineering sciences, 2007, 365(1853), s. 1010.

21 SMIL, Václav, Energie – průvodce pro začátečníky, Zlín 2018, in: Sciencemag.cz, 31. 7. 2018, dostupné online na:
<<https://sciencemag.cz/fotosynteza-a-jeji-ucinnost/>> [15. 4. 2024].

22 NEALSON, Kenneth, H. – CONRAD, Pamela, G., Life: past, present and future, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 1999, 354(1392), s. 1923–1939.

23 ABAS, Naeem – KALAIR, Esmat – KALAIR, Anam et al., Nature inspired artificial photosynthesis technolgis for hydrogen production: barriers and challenges, International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(41), s. 2087.

3.1.3 Fotosyntetické pigmenty

Pigmenty hrají v procesu fotosyntézy zásadní roli, neboť míra fotosyntetické aktivity je podmíněna množstvím fotosynteticky aktivních pigmentů, které jsou schopny se do procesu energeticko-chemické přeměny zapojit.

Pigmenty a jejich konjugované vazby jsou schopné absorbovat různé vlnové délky viditelného světla a získat tak dostatečné množství energie potřebné k výrobě glukózy a kyslíku. Změny zbarvení rostlin jsou dány právě přítomností těchto látek v buňce. Různá barevnost závisí na selektivní absorpci světla.²⁴

Zachycení světla pigmentem spouští celý proces fotosyntézy. Mezi hlavní skupiny pigmentů, které jsou pro proces fotosyntézy nezbytné, patří chlorofyly, karotenoidy a fykobiliny. Každá skupina fotopigmentů má svou specifickou roli a umožňuje vysokou efektivitu. Díky nim mohou fotosyntetizující organismy absorbovat velké množství světelné energie z různých částí světelného spektra.

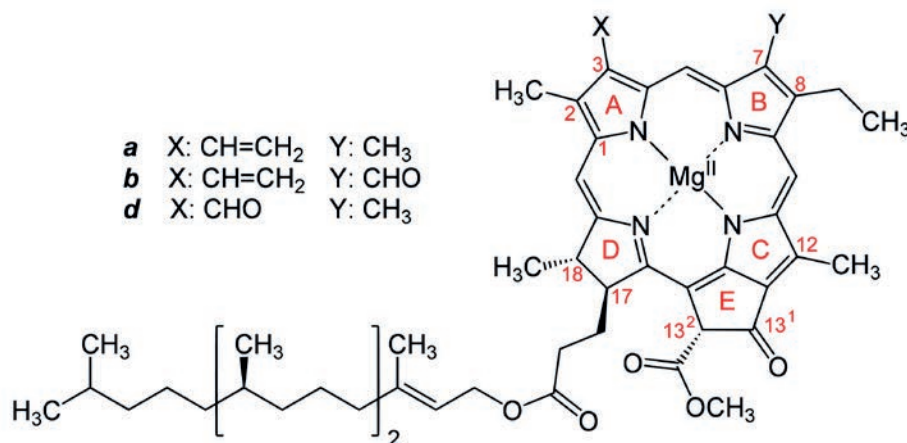
Chlorofyl uložený v chloroplastech je pro fotosyntézu nejzásadnější pigment. Je zelený a je obsažen ve většině rostlin, ale také v dalších fotosyntetizujících organismech, jako jsou některé druhy řas a sinic. Přesto ho v rostlinách nenacházíme v závratných objemech, naopak v poměru k 1 kilogramu zelené rostlinné hmoty zabírá chlorofyl pouhých 2–6 gramů.

Chlorofyl absorbuje světlo především v modré a červené části spektra, zatímco zelená část světla je odrážena či propouštěna. Tato schopnost absorpce a odrazu světla dává rostlinám jejich charakteristickou barvu. Chlorofyl se vyskytuje v několika typech, přičemž nejvýznamnější pro fotosyntézu jsou chlorofyl *a* a *b*. Každý z nich má odlišné absorpční schopnosti světla.

Pouze chlorofyl *a* dokáže přeměnit energii fotonu na energii vázanou v chemických vazbách cukru. Fotosyntetické reakční centrum v membráně thylakoidů chloroplastu obsahuje speciální pár chlorofylu *a*. Reakční centrum je součástí fotosystému I a II. Chlorofyl v reakčním centru fotosystému II se označuje P680, podle vlnové délky, kterou maximálně absorbuje.²⁵ Centrálně v molekule je umístěn atom hořčíku, na který jsou navázána čtyři pyrolová jádra, na jednom z nich je připojena fytolová část.²⁶

Zajímavostí je, že molekula chlorofylu je svým složením velmi podobná krevnímu barvivu hemoglobinu. Obě molekuly patří do skupiny tzv. metaloporfyrinů, organických sloučenin, které tvoří komplexy s kovovými ionty. Zatímco hemoglobin váže atom železa (patří mezi hemy), chlorofyl váže atom hořčíku.²⁷ A zatímco chlorofyl se podílí na procesu uvolňování kyslíku, hemoglobin jej transportuje v tělech a tím zajišťuje proces oxidace, tedy „spalování“ kyslíku v procesu dýchání.

Kromě chlorofylů rostliny obsahují další doprovodná barviva ze skupiny karotenů a fykobilinů. Tyto pigmenty jsou součástí



Strukturní vzorec molekuly chlorofylu. Molekulu tvoří porfyrinový kruh (A–E) s centrálně vázaným iontem hořčíku a dále lineární molekula fytolu (vlevo dole). Podle navázání různých funkčních skupin ve vazebných místech označených X a Y se rozlišují jednotlivé varianty chlorofylu, konkrétně chlorofyl *a*, *b* a *d*. Autor ilustrace: Yikrazuul; Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0

24 Technická univerzita Ostrava, Katedra geologického inženýrství, Pigmenty a barviva, dostupné online na:

http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/pigmenty_barviva.html [9. 4. 2024].

25 Studium biochemie.cz, fotosyntéza, KUDCH, PřF UK v Praze, dostupné online na:

http://www.studiumbiochemie.cz/materialy/zakladni_kapitoly/fotosynteza/video/3_HTML5%20Canvas.mp4 [10. 5. 2024].

26 ŠEBÁNEK, J., et al. Fyziologie rostlin, c. d., s. 145–146.

světlosběrného komplexu. Fungují jako antény a předávají energii fotonu z jedné molekuly pigmentu na druhou. Takto energie doputuje až do reakčního centra ke chlorofylu *a*, který foton pohltí a jeho energii využije k excitaci do vyššího energetického stavu.

Skupinu karotenoidů tvoří karoteny a xantofyly. Karotenoidy patří mezi doplňkové pigmenty, které mají žluté, oranžové a červené barvy a rozšiřují objem světelné energie, kterou mohou rostliny a jiné organismy využít pro fotosyntézu. Kromě své role v absorpci světla poskytují karotenoidy také ochranu chlorofylu před poškozením způsobeným přebytečným světlem tím, že pomáhají rozptylovat světelnou energii. Karotenoidy určují barvu různých druhů ovoce, zeleniny, ale také například podzimního listí.

Karoteny se nachází v buněčné membráně a rozpouštějí se v tucích (jsou lipofilní). Do skupiny patří například α -karoten, β -karoten nebo lykopen. Xantofyly zbarvují svého nositele žlutě až červenofialově. Vyskytují se v rostlinách, řasách, sinicích, bakteriích, houbách a u živočichů. V rostlinné říši je obsahují všechny zelené druhy. Do skupiny xantofylů patří následující rostlinné pigmenty:

- astaxantin – červený pigment obsažený např. v mořských plodech (humři, krevety), ale též mikrořasách;
- kapsantin – zbarvuje žlutočerveně až oranžovočerveně, je obsažen např. v plodech paprik (*Capsicum*);
- kryptoxantin – patří mezi provitaminy A (v lidském organismu je přeměňován na vitamin A), vyskytuje se v plodech papáji obec-

né (*Carica papaya*) nebo plodech mochyně peruánské (*Physalis peruviana*);

- lutein – zbarvuje žlutě v nízkých koncentracích a ve vyšších oranžovočerveně, najdeme ho např. v květech pampelišek (*Traxacum*) nebo slunečnic (*Helianthus*);
- myxoxantofyl – najdeme ho u sinic (Cyanobacteria);
- neoxantin – je přítomen v listové zelenině, např. v listech špenátu (*Spinacia*);
- rhodoxantin – zbarvuje do červena, najdeme ho například v plodech tisu červeného (*Taxus baccata*);
- violaxantin a izomer luteinu zeaxantin – je přítomen např. v obilkách kukuřice (*Zea*).

Fykobiliny jsou dalšími doplňkovými pigmenty, které se vyskytují u některých řas a sinic. Díky nim může fotosyntéza probíhat i při velmi nízké hladině osvětlení, například hluboko pod hladinou vody, v půdě či jeskyních atd. Fykobiliny se vyskytují především u sinic (Cyanobacteria), skrytěk (Cryptophyta), rozsivek (Diatomeae), hnědých řas (Phaeophyceae), ruduch (Rhodophyta) a krásnooček (Euglenoidea). Do této skupiny fotosyntetických pigmentů patří modrý fykocyanin, červený fykoerytrin a vzácnější modrý allofykocyanin.²⁸

Každý z těchto pigmentů přispívá ke zvýšení efektivity fotosyntézy. Umožňuje rostlinám a dalším organismům absorbovat co největší množství světelné energie z různých částí světelného spektra.

27 HENDRY, G., F. – JONES, O., T., Haems and chlorophylls: comparison of unction and formation, Journal of Medical Genetics, 1980, 17, s. 1–14.

28 ŘÍMAN, Josef (ed.), Malá československá encyklopedie, VI. svazek S–Ž, Praha 1987.

Žluté podzimní zbarvení listů způsobené přítomností xantofylů (autor fotografie: Jana Melcrová)



3.1.4 Fotosyntetické organely

Proces fotosyntézy se u eukaryotických organismů odehrává v chloroplastu. Chloroplasty jsou buněčné orgány sloužící jako buněčná továrna na výrobu cukru z vody a oxidu uhličitého.

V jedné buňce může být jeden i tisíce chloroplastů. Mohou mít různý tvar, nejčastěji jsou to elipsoidy o velikosti cca 5 μm .

Chloroplast je ohraničený dvěma membránami – vnější je relativně propustná, zatímco vnitřní téměř nepropustná. Jeho vnitřek vyplňuje matrix zvaná stroma. Ta obsahuje enzymy, ale také chloroplastovou DNA, RNA a ribozomy. Ve stromatu jsou uloženy také váčky zvané thylakoidy. Thylakoidy mohou být nasklá-

dané na sebe do tzv. gran, která se podobají mincím v komínku (v chloroplastu jich bývá 10–100), ale mohou být i samostatné. Některé stromální thylakoidy, zvané lamely, mezi sebou propojují grana. Thylakoidy jsou uvnitř duté, tyto dutiny se nazývají lumen.²⁹ Na membráně thylakoidů probíhá fotosyntéza.

V prokaryotických buňkách, jako jsou bakterie a archea, chloroplasty nenajdeme. Nicméně některé prokaryotické organismy, zejména sinice (cyanobakterie), jsou také schopny fotosyntézy. Tato prokaryota mají fotosyntetické pigmenty, ale ty nejsou uloženy v chloroplastech; místo toho jsou rozptýleny v buněčné membráně nebo vnitřních membránových systémech buňky.

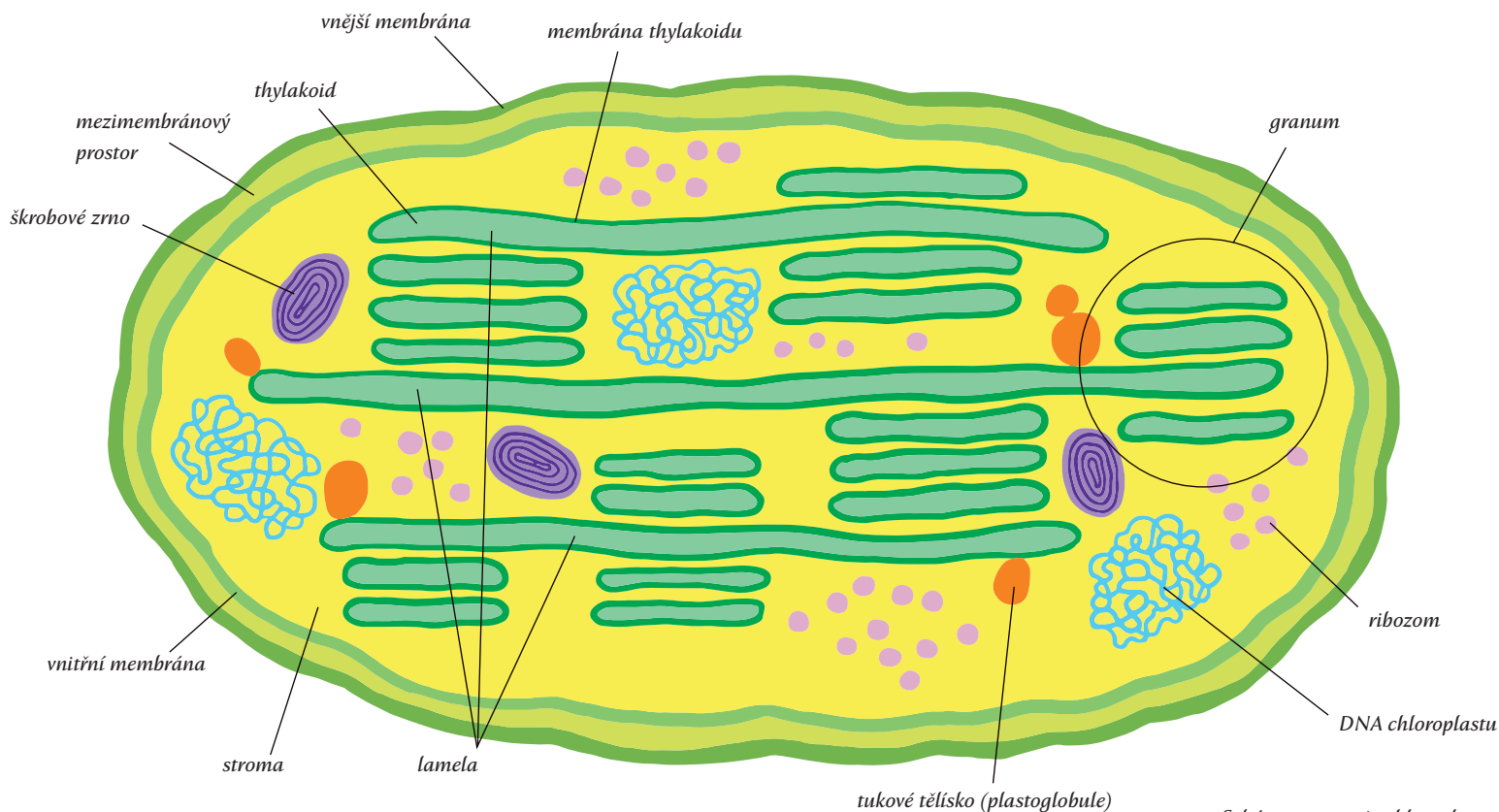


Schéma anatomie chloroplastu

29 VOET, Donald – VOETOVÁ, Judith, Biochemie, Praha 1995, s. 658–659.

3.2. Kde se vzala fotosyntéza?

3.2.1 Kdy vznikla fotosyntéza a kdo ji vynalezl?

Nejstarší důkazy o možné přítomnosti fotosyntetického života byly objeveny na lokalitě v Jack Hills v Západní Austrálii, kde se nalézají vzorky minerálu zirkonu staré až 4,4 miliardy let (zirkon je nejstarším minerálem na světě). Některá zirkonová jádra pocházející z této lokality z období před 3,3 až 4,2 mld. let v sobě mají zalaty kousky grafitu (tedy vlastně uhlíku), které obsahují výrazně více uhlíkového izotopu ^{12}C v poměru k izotopu ^{13}C . Takový posun v chemickém složení vzniká působením složitých biologických procesů fixace uhlíku, který probíhá například při fotosyntéze. Znamenalo by to, že tento cca čtyři miliardy let starý grafit může být pozůstatkem činnosti fotosyntetických organismů. Jedná se však jen o nepřímý důkaz, neboť nevíme, jakým extrémním podmínkám byl prastarý vzorek grafitu vystaven během miliard let své existence³⁰ ani zda fixace uhlíku probíhala zrovna fotosyntézou.³¹

Stáří planety Země se odhaduje na cca 4,5 miliardy let.³² Pokud jsou tedy kousky grafitu skutečně památkou na organismy (navíc fotosyntetizující), znamenalo by to, že se život objevil takřka „okamžitě“ po vzniku Země, a to v období přízračně nazývaném hadaikum čili hádské období (4,5–4 miliardy let před současností), podle Háda, řeckého boha podsvětí. V tomto období byla Země bombardována meteority, přesto však vznikaly první pevné zemské kry a oceány pod prvotní atmosférou tvořenou metanem, vodíkem, heliem a amoniakem. Později po ochlazení povrchu Země a vzniku oceánů byla atmosféra obohacena o velké množství dusíku a oxidu uhličitého.

Austrálie hraje prim i v dalším objevu – tentokrát už nejde jen o kousky uhlíku, ale celé mikrofosilie vřetenovitého či kulovitého tvaru o velikosti cca 20–60 mikronů (malé zrnko písku), v některých případech vytvářející shluky podobné koloniím. Nalezeny byly v australské horninové formaci Farellův kvarcit staré téměř tři miliardy let. Uhlíková analýza izotopů ^{12}C a ^{13}C opět ukázala, že by se mohlo jednat o pozůstatky fotosyntetizujících organismů, snad pradávného mořského planktonu. Velikost mikrofosilií by odpovídala, podobně velké fosilní objekty byly navíc nalezeny i ve vrstvách ve Strelley Pool (Západní Austrálie) a Onverwacht (Jihoafrická republika a Svazijsko) starých do-

konce 3,4 miliardy let.³³ Ze stejného období před 3,5 mld. let pochází i vrstevnaté struktury podobné stromatolitům (formace Warrawoona v Západní Austrálii), které jsou typicky produkované fotosyntetizujícími organismy.³⁴ Je tedy možné, že již před třemi a půl miliardami let probíhala v oceánech čilá fotosyntéza. Vzhledem k extrémnímu stáří mikrofosilií je třeba i zde zachovat určitou opatrnost (například v údajných stromatolitech nejsou dochovány žádné buněčné struktury), nicméně jejich „pravost“ potvrzují i studie založené na vysoce pokročilých analytických metodách, jako je například NanoSIMS.³⁵

Prvotní fotosyntetizující organismy patřily mezi prokaryota, tedy jednobuněčné organismy, které nemají buněčné jádro a jejich DNA je volně uložena v buňce. Konkrétně se jednalo o bakterie a také prokaryota z domény Archaea. Jejich fotosyntéza neprodukovala kyslík, jednalo se o tzv. anoxygenní fotosyntézu, kterou některá archea a bakterie (například „fialové bakterie“) využívají dodnes. Nejvýznamnější z nich byla patrně fotosyntéza s použitím světla jako zdroje energie k fixaci uhlíku a železa jako donoru elektronu (angl. photoferrotrophy).³⁶ Existence této ancestrální fotosyntézy je základem hypotézy tzv. fialové planety. Podle této hypotézy organismy s anoxygenní fotosyntézou



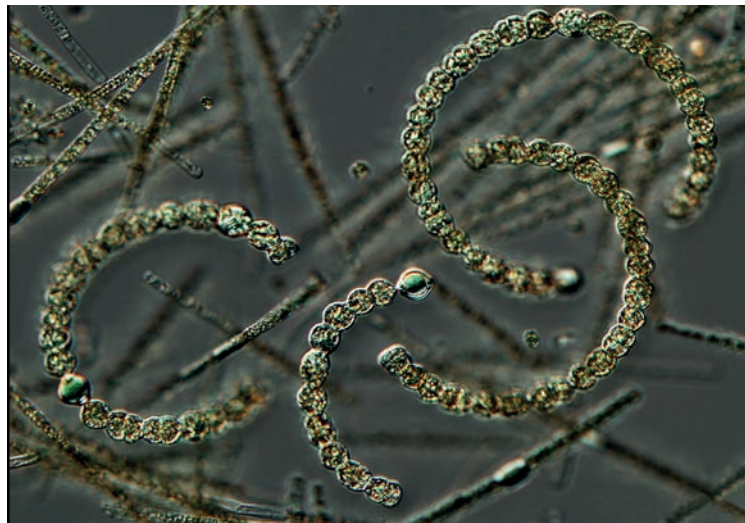
Páskovaná železná ruda (materiál: jednostranně leštěná deska hematitu; lokalita: Jihoafrická republika; datace: stáří cca 2 miliardy let; rozměry: 13 x 9 x 1,5 cm; inv. č.: P1N116846; uložení: Sbírka Národního muzea; autor fotografie: Dalibor Velebil)

pohlcovaly především zelenou část světelného spektra, která nese nejvíce energie, a odrážely světlo fialové. Planeta tak při pohledu z vesmíru nebyla modrá a zelená, ale měla fialový nádech.

Tato hypotéza též vysvětluje, proč dnešní organismy využívající k fotosyntéze chlorofyl kupodivu zelené světlo nevyužívají (přestože nese nejvíce energie) a naopak ho odrážejí či propouštějí. Pokud složitější „zelená“ fotosyntéza založená na chlorofylu vznikla až po té fialové, některé organismy se snažily vyhnout fialové konkurenci a rozhodly se využívat jiné části viditelného světla. A protože chlorofyl byl mnohem efektivnější než retinol, nakonec v evolučním souboji zvítězily a své konkurenty téměř vytlačily, ovšem k zelenému světlu se již nevrátily. Nicméně důvod, proč rostliny zelenou část spektra nevyužívají, může být mnohem jednodušší – zelené světlo má energie až příliš a mohlo by rostlinu poškodit. Ostatně i první zástupci zelené fotosyntézy – sinice čili cyanobakterie³⁷ – žili pod hladinou, kde byli před ostrými paprsky částečně chráněni vrstvou vody.³⁸

Ale kdy se tito první zástupci oxygenní fotosyntézy objevili? Nejstarší zjevné známky přítomnosti sinic spadají do doby před cca 2,5 až 2,7 mld. let. V sedimentech z této doby je přítomná organická sloučenina 2-methylhopanoid. Ta vzniká z 2-methylbakteriohopanepolyolů, které jsou produktem metabolismu ty-

Stromatolit (materiál: nepravidelně laminovaný silicit; lokalita: Česko Příkosice; datace: 700–525 milionů let (barrandien, svrchní proterozoikum); rozměry: 12 x 8 x 6 cm; inv. č. P1H25178; uložení: Sbírka Národního muzea; autor fotografie: Dalibor Velebil)



Mikrofotografie recentní planktonní sinice Dolichospermum circinale. Zástupci rodu Dolichospermum patří mezi běžné sladkovodní sinice s kosmopolitním výskytem. Najdeme je také v Česku (autor fotografie: Petr Znachor; fytoplankton.cz)

pickým pro sinice, jedná se tedy o tzv. biomarker, indikátor přítomnosti sinic.³⁹ První neoddiskutovatelné mikrofosilie sinic se objevují před cca 2,5–2,1 mld. let především v podobě stromatolitů, což jsou mineralizované vrstevnaté hlízovité útvary vytvářené sinicemi.³⁹ Stromatolity okupovaly takřka všechny mořské i sladkovodní mělké vody v tzv. fotické zóně (hloubka vody do cca 100 m, do které proniká bílé světlo). Přítrž bujení stromatolitů udělala až kambrijská exploze mnohobuněčných živočichů před cca 540 miliony let, kteří začali sinice spásat. Od té doby množství stromatolitů klesalo a dodnes se v živé podobě zachovaly jen v Austrálii, konkrétně v západoaustralských zátokách s vysokou salinitou vody, a v extrémně slaných vnitrozemských jezerech (Chile, Britská Kolumbie), ve kterých toho kromě sinic moc nežije.

S rozvojem sinic souvisí první výrazné projevy oxygenní fotosyntézy před dvěma a půl až dvěma miliardami let, kdy se v atmosféře začíná výrazně kumulovat její produkt – kyslík.⁴⁰ Tato událost se poeticky nazývá „Velká kyslíková katastrofa“ nebo vědeckěji „Velká oxidační událost“. V důsledku narůstajícího množství kyslíku produkovaného sinicemi se do té doby téměř bezkyslíkatá a slabě redukční atmosféra Země proměnila v oxidační. Přítomnost výrazného množství volného kyslíku v prostředí do-

kládá vznik mohutných vrstev páskované železné rudy, vzniklé oxidací železa v mořské vodě (ta do té doby obsahovala značné množství železa).⁴¹ Tyto usazeniny jsou dodnes největším depozitem železa na světě.⁴² Postupný nárůst podílu kyslíku v atmosféře paradoxně vedl k vyhynutí mnoha organismů adaptovaných na život v doposud bezkyslíkatých (anaerobních) podmínkách, včetně řady bakterií využívajících anoxygenní fotosyntézu. Sinice s oxygenní fotosyntézou se tak zbavily konkurence, kterou doslova otrávil svým kyslíkem.

Kyslíku ovšem nebylo zdaleka takové množství, na jaké jsme zvyklí – v atmosféře ho byla jen cca desetina současného množství. Přesto podnítil rozvoj mnohobuněčného života. Přežijí anaerobní bakterie se totiž musely s nepříjemným kyslíkem nějak vypořádat. Některé unikly do zbývajících bezkyslíkatých prostředí (například hlubiny oceánů). Jeden z nadkmenů heterotrofních prokaryot skupiny Archaea zvaný Asgard zase pohltil proteobakterii, která byla aerobní, uměla tedy „dýchat“ – využívat kyslík k získání energie. Z pohlcené proteobakterie (mezi proteobakterie mimochodem patří třeba *Salmonella*) vznikla uvnitř arche-

bakterie organela zvaná mitochondrie, oddělená od okolní hmoty buňky membránou. Kombinací archebakterie a proteobakterie tak vznikl nový organismus – buňka s vnitřními organelami s membránami a DNA uzavřenou v jádru, tzv. eukaryotická buňka. Tyto buňky se poprvé objevily před cca 2,7 mld. let.⁴³ Díky mitochondriím byly schopné využívat kyslík a postupně se z nich vyvinuly mnohobuněčné organismy včetně člověka. Svět bez kyslíku tak nahradil svět organismů na kyslíku závislých.

Zůstaňme ale ještě u jednobuněčných eukaryotických buněk. Ty se totiž nezastavily u proteobakterií a část z nich navíc pohltila i již zmíněné sinice. Z buňky sinice vznikla další organela – chloroplast, který umožňuje eukaryotickým buňkám fotosyntetizovat. Touto endosymbiotickou událostí vznikla obrovská skupina „zelených“ jedno- a mnohobuněčných organismů náležející do říše rostliny (Plantae). Genetická studie odhalila, že ke vzniku chloroplastů (tedy pohlcení sinice) mělo dojít teprve před cca 900 miliony let. To je ovšem podivně pozdě. Konzervativnější odhady založené na fosiliích se přiklánějí spíše k datu někde mezi jednou až dvěma miliardami let.⁴⁴

30 BELL, Elizabeth, A. – BOEHNKE, Patrick – HARRISON, Mark, T. et al., Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(47), s. 14518–14521.

31 BLANKENSHIP, Robert E., Early evolution of photosynthesis, Plant Physiology, 2010, 154(2), s. 434–438.

32 DALRYMPLE, G., Brent, The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved. Special Publications, Geological Society of London, 2001, 190(1), s. 205–221.

33 HOUSE, Christopher, H. – OEHLER, Dorothy, Z. – SUGITANI, Koji et al., Carbon isotopic analyses of ca. 3.0 Ga microstructure simply planktonic autotrophs inhabited Earth's early oceans, Geology, 2013, 41(6), s. 651–654.

34 DESMARAIS, David, J., When did photosynthesis emerge on Earth? Science, 2000, 8, s. 1704.

35 OEHLER, Dorothy, Z. – FRANCOIS, Robert – WALTER, Malcolm, R. et al., NanoSIMS: insights to biogenicity and syngeneity of Archaean carbonaceous structures, Precambrian Research, 2009, 173(1–4), s. 70–78.

36 CAMACHO, Antonio – WALTER, A., Xavier – PICAZO, Antonio et al., Photoferrotrophy: remains of an ancient photosynthesis in modern environments, Frontiers in Microbiology, 2017, 8, 223563.

37 Sinice jsou mimochodem dodnes jediní zástupci prokaryot, kteří ovládají oxygenní fotosyntézu.

38 THAN, Ker, Early Earth was purple, Study Suggests, Live Science, 14. 10. 2022. Dostupné online na: <<https://www.livescience.com/1398-early-earth-purple-study-suggests.html>> [25. 4. 2024].

39 SUMMONS, Roger, E. – JAHNKE, Linda, L. – HOPE, Janet, M. et al., 2-Methyl hopanoids as biomarkers for cyanobacterial oxygenic photosynthesis, Nature, 1999, 400(6744), s. 554–557.

40 BLANKENSHIP, Robert E., Early evolution of Photosynthesis, c. d., s. 434–438.

41 THOMPSON, Katherine, J. – KENWARD, Paul, A. – BAUER, Kohen, W. et al., Photoferrotrophy, deposition of banded iron formations, and methane production in Archean oceans, Science advances, 2019, 5(11), eaav2869.

42 Bohužel to zas není tak jednoduché, je možné, že oxidaci železa mohla způsobit již zmíněná anoxygenní fotosyntéza fixující uhlík za pomoci železa jako donoru elektronu namísto vody. Pokud by tomu tak bylo, uvolňovalo by se do atmosféry značné množství metanu, které by přispívalo ke stabilizaci atmosféry (oteplení), viz například THOMPSON, Katherine, J. – KENWARD, Paul, A. – BAUER, Kohen, W. et al., Photoferrotrophy, deposition of banded iron formations, c. d.

43 Odhad na základě přítomnosti steranových biomarkerů v sedimentech, viz BROCKS, Jochen, J. – LOGAN, Graham, A. – BUICK, Roger et al., Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes, Science, 1999, 285(5430), s. 1033–1036.

44 Podrobněji viz SÁNCHEZ-BARACALDO, Patricia – RAVEN, John A. – PISANI, Davide et al., Early photosynthetic eukaryotes inhabited low-salinity habitats, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(37), E7737–E7745; MCFADDEN, Geoffrey – I., VAN DOOREN, Giel, G., Evolution: red algal genome affirms a common origin of all plastids, Current Biology, 2004, 14(13), R514–R516.

3.2.2 Endosymbióza a původ chloroplastů

Chloroplast, který je popsán v kapitole 2. 1.4, patří do velké rodiny plastidů, buněčných organel uzavřených v membráně a uložených uvnitř eukaryotických buněk. Plastidy vytvářejí řadu forem, které v buňkách slouží nejrozličnějším účelům. Například v chromoplastech se syntetizují a ukládají pigmenty (jsou zodpovědné například za barvu květů), leukoplasty a apikoplasty zase slouží například k syntéze hemu či mastných kyselin, leukoplasty také jako zásobníky škrobů. V chloroplastech probíhá fotosyntéza.

Plastidy jsou prokaryotického (bakteriálního) původu – původně se jednalo o volně žijící fotosyntetizující bakterie ze skupiny sinic (cyanobakterie). Tyto sinice se posléze staly symbiontem (tzv. cyanosymbiontem), který žije vně nebo uvnitř buněk hostitele. V symbiotickém vztahu fotosyntetizující sinice poskytuje hostiteli živiny (především fixuje dusík) a v některých případech i ochranu před UV zářením⁴⁵ výměnou za ochranu před vnějšími vlivy prostředí. K tomuto typu symbiózy tak dochází většinou v málo úživném (oligotrofním) prostředí, a to ve vodě i na souši. Podobné symbiotické vztahy sinic a eukaryot jsou k vidění i dnes – známá je například symbióza sinic (a řas) s houbami, které společně vytvářejí symbiotické společenství zvané lišejník.

V dlouhodobém symbiotickém vztahu začaly sinice postupně ztrácet části genomu v procesu zvaném genetická eroze, kdy se mutace hromadí v genech, které pro přežití symbiotických sinic již nejsou důležité.⁴⁶ Část genů sinic se také přesunula do jádra hostitelské buňky, například geny opravující poškozenou DNA.⁴⁷ Symbiotické sinice tak zcela ztratily autonomii a staly se buněčnou organelou – plastidem. Tento proces vzniku plastidu se nazývá endosymbióza.

K první endosymbiotické události došlo před cca 1,5⁴⁸–1,65⁴⁹ mld. let mezi sinicemi příbuznými skupině Gloeo-

margarita a eukaryotickou buňkou.⁵⁰ Vznikla tak obrovská skupina organismů s fotosyntetizujícími plastidy zvaná Archaeplastida. Do této skupiny patří zelené rostliny, červené řasy, glaukofyty, malá jednobuněčná eukaryota ze skupiny Picozoa a jednobuněční bičíkatí dravci s nefotosyntetizujícím plastidem ze skupiny Rhodelphidia. Plastidy těchto linií Archeoplastid mají stejný původ, protože se však během další evoluce anatomicky rozrůznily, nazýváme je odlišnými názvy – zelené rostliny mají chloroplast, červené řasy rhodoplast a glaukofyty muroplast.

K další významné vlně endosymbiózy u eukaryot došlo před 140–90 miliony let u fotosyntetizující měňavky rodu *Paulinella*, její plastid se nazývá cyanella.

V obou případech se jedná o tzv. primární endosymbiózu, tedy pohlcení prokaryotické buňky buňkou eukaryotickou. Během evoluce následně došlo ještě k několika případům takzvané sekundární endosymbiózy, kdy eukaryotická buňka pohltila jinou eukaryotickou buňku s plastidem. Mezi fotosyntetizující organismy, které získaly své plastidy sekundární endosymbiózou, patří například chaluhy, obrněnky, skrytěnky, rozsivky či krásnoočka.

3.3 Zelená planeta – rostliny dobývají souš

Říše rostlin (Plantae) je součástí superskupiny Archaeplastida (viz předchozí podkapitola). Zahrnuje zelené rostliny (mnobuněčné a jednobuněčné – zelené řasy), červené řasy a glaukofyty. Fotosyntetickou organelou rostlin je chloroplast, buněčná stěna rostlin obsahuje celulózu, zásobní látkou je škrob.

Fotosyntézu si typicky spojujeme se zelenými řasami a rostlinami (Viridiplantae, dříve též Chlorobionta), které jsou v současnosti nejvýznamnějšími primárními producenty na Zemi a nejdůležitějšími organismy s hospodářským významem pro lidstvo (viz

45 SRIVASTAVA, Ashish K. – RAI, Amar N. – NEILAN, Brett A., Stress Biology of Cyanobacteria: Molecular mechanisms to cellular responses, Boca Raton 2013.

46 RAN, Liang – LARSSON, John – VIGIL-STENMAN, Theoden et al., Genome Erosion in a nitrogen-fixing vertically transmitted endosymbiotic multicellular Cyanobacterium, Public library of science one, 2010, 5(7), e11486.

47 OLDENBURG, Delene, J. – BENDICH, Arnold, J., DNA maintenance in plastids and mitochondria of plants, Frontiers in Plant Science, 2015, 6, 883.

48 MOORE, Kelsey, R., MAGNABOSCO, Cara, MOMPER, Lily et al., An Expanded Ribosomal Phylogeny of Cyanobacteria Supports a Deep Placement of Plastids, Frontiers in Microbiology, 2019, 10, 1612.

49 CHEN, Na, Oldest Fossils of Multicellular Eukaryotes Found in North China, Chinese academy of Sciences, 26. 1. 2024, dostupné online na: <https://english.cas.cn/newsroom/cas_media/202401/t20240126_656735.shtml> [15. 4. 2024].

50 MOORE, Kelsey, R., MAGNABOSCO, Cara, MOMPER, Lily et al., An Expanded ribosomal phylogeny of Cyanobacteria supports a deep placement of plastids, Frontiers in Microbiology, 2019, 10, 1612.

kapitola 4, Fotosyntéza ve službách člověka). Zbytek textu katalogu bude věnován právě zástupcům této evoluční linie (kladu).

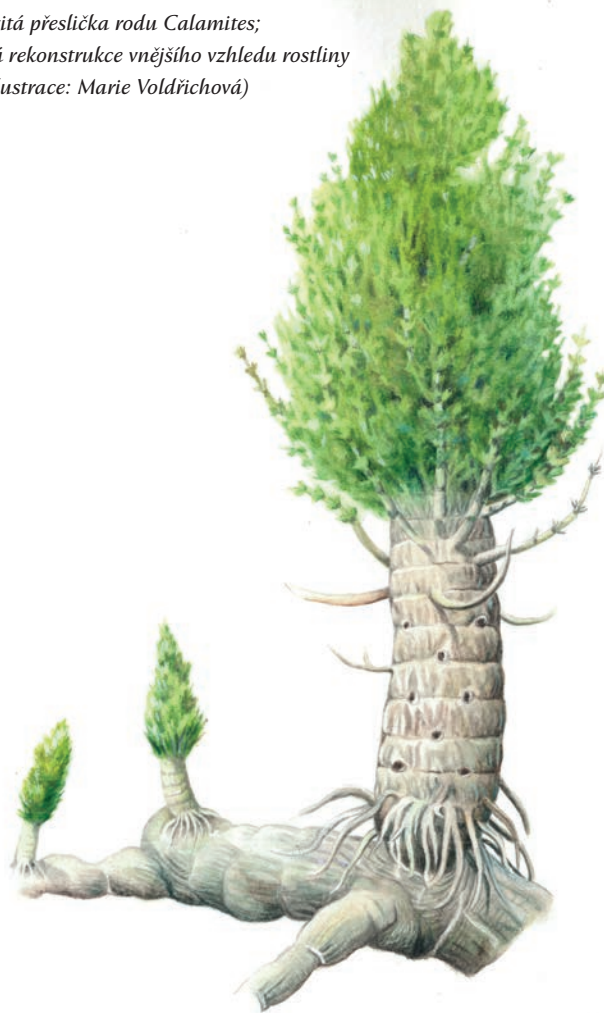
V současnosti známe 6 851 druhů zelených řas⁵¹ a 377 216 druhů mechů a cévnatých rostlin,⁵² což jsou plavuně, kapradiny a semenné rostliny. Původní zelené rostliny měly podobu jednobuněčných vodních řas, které spolu se sinicemi dodnes tvoří sladkovodní i mořský plankton (přibližně 90 % druhů zelených řas je sladkovodních). Postupně se z nich vyvinuly mnohobuněčné rostliny.

Nejstarší známou mnohobuněčnou zelenou rostlinou je vláknitá zelená řasa *Qingshania magnifica*. Její fosilie nalezené v severočínské formaci Čuanlinggou pochází z doby před 1,64 mld. let. Zachované fragmenty nevětvených vláken jsou složeny z řetězce až 20 buněk, což z *Qingshanie* činí rostlinného „obra“ své doby.⁵³ Z doby před 1,6 mld. let pochází i nejstarší mnohobuněčný zástupce červených řas, také s vláknitou strukturou. Jeho pozůstatky byly nalezeny ve fosiliích stromatolitů z lokality Čitrakút ve střední Indii.⁵⁴ Tyto nálezy potvrzují, že ke vzniku mnohobuněčných rostlin došlo prakticky okamžitě po endosymbiotické události, která vedla k akvizici chloroplastů (viz předchozí podkapitola). A nejen to – již krátce po vzniku dosahovaly mnohobuněčné řasy úctyhodných rozměrů – části vláken fosilních zelených či červených řas starých 1,56 miliardy let již dosahují délky 30 centimetrů.⁵⁵

Všechny tyto rostliny žily ve vodě, konkrétně v oceánech. V tomto prostředí mohly přijímat vodu a živiny celým povrchem těla a nemusely se obávat ztráty vody odparem. Aby mohly kolonizovat souš,⁵⁶ musely si vyvinout řadu speciálních pletiv a orgánů, které by jim v novém nehostinném prostředí umožnily přežít.

Mezi tyto orgány patří například rhizoidy, které rostlinu kotví v substrátu, a vodivá pletiva umožňující transport vody po těle rostliny. Nejedná se ale o cévy cévnatých rostlin. První rostliny s těmito charakteristikami vystoupily na souš před cca

Stromovitá přeslička rodu Calamites;
výtvarná rekonstrukce vnějšího vzhledu rostliny
(autor ilustrace: Marie Voldřichová)



51 GUIRY, Michael D. How many species of algae are there? A reprise. Four kingdoms, 14 phyla, 63 classes and stillgrowing, Journal of Phycology, 2024, 60, 8037.

52 An online flora of all known plants, dostupné online na: <<https://worldfloraonline.org/>> [5. 6. 2024].

53 MIAO, Lanyun – YIN, Zongjun – KNOLL, Andrew, H. et al., 1.63-billion-year-old multicellular eukaryotes from the Chuanlinggou Formation in North China, Science Advances, 2024, 10(4), eadk3208.

54 BENGTON, Stefan – SALLSTEDT, Therese – BELIVANOVA, Veneta – WHITEHOUSE, Martin, Three-dimensional preservation of cellular and subcellular structures suggests 1.6 billion-year-old crown-group red algae, Public library of science Biology, 2017, 15(3), e2000735.

55 ZHU, Shixing – ZHU, Maoyan – KNOLL, Andrew, H. et al., Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China, Nature communications, 2016, 7(1), 11500; titíž, Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China, Nature Communications, 2016, 7(1), 11500.

56 První suchozemské fotosyntetické organismy byly vlastně sinice, ale ty vytvářely jen bakteriální povlaky.

470 miliony let.⁵⁷ Nazývají se Embryophyta a mezi jejich zástupce patří mechorosty (Bryophyta).

Skutečnými kolonizátory souše se stali až potomci embryofyt, cévnaté rostliny (Tracheophyta), které charakterizuje několik pokročilých morfologických novotvarů. Rhizoidy nahradily kořeny, které kromě kotvící funkce umožňují rostlině vstřebávat vodu a minerální látky z půdy, pokožka zvaná kutikula, která brání odparu vody, pravá vodivá pletiva (cévice a cévy, floém), která rozvádějí získané roztoky a živiny po těle rostliny, a silná buněčná stěna vyztužená celulózą, která mimo jiné zpevňuje buňky a umožnila části cévnatých rostlin dosáhnout obrovských rozměrů. Za nejstarší cévnaté rostliny je považován taxon *Cooksonia* z dob před 433–393 miliony let, který představuje jakýsi přechod mezi skupinami Embryophyta a Tracheophyta. Jen několik centimetrů vysoká rostlinka neměla kořeny, listy ani květy, měla však již vyvinuté cévy a průduchy.⁵⁸

Po vzniku cévnatých rostlin následovala rychlá evoluční i adaptivní radiace a expanze, která vedla v období pozdního devonu před cca 380 miliony let ke vzniku rozsáhlých komunit rostlinných organismů. Objevují se první lesy tvořené rostlinami ze skupiny Cladoxylopsida (např. *Wattieza*) a příbuznými stromovitými plavuněmi, přesličkami a kapradinami a dále pranahosemennými rostlinami (Progymnospermae). *Archaeopteris*, zástupce posledně jmenované skupiny, vytvářel skutečné dřevo a běžně dosahoval výšky 24 metrů.⁵⁹ Je tak nejstarší známou rostlinou, která vytvářela pravou stromovitou formu. Kromě rostlin tvořila lesy i bizarní houba rodu *Prototaxites*, jejíž „kmen“ měl průměr až jeden metr a výšku osm metrů.⁶⁰ Se svými parametry byla největším suchozemským organismem své doby (houby nicméně ne-

jsou rostliny, spolu s živočichy patří do superskupiny Obazoa⁶¹ a v přírodě povětšinou plní funkci rozkladačů a parazitů).

Země se v té době poprvé výrazně zazelenala a tato zelená revoluce měla obrovský dopad na biosféru. Jednalo se o jednu z nejvýznamnějších událostí v historii Země – vlivem činnosti rostlin začaly vznikat první půdy a depozita nové horniny – uhlí.⁶² Rostlinná společenstva pomocí fotosyntézy efektivně absorbovala z ovzduší velké množství skleníkového plynu oxidu uhličitého, což vedlo k ochlazení klimatu. Velké množství fosforu čerpaného kořenovým systémem rostlin bylo po úhynu rostlin splachováno do řek a z nich do mořských ekosystémů. Vysoká koncentrace fosforu v mořích vytvářela podmínky k nadměrnému růstu fytoplanktonu. Následným odumíráním fytoplanktonu, jehož rozklad spotřebovával kyslík ve vodě, byl generován vznik anoxických (bezokyslíkatých) zón. Změna klimatu a oběhu prvků nastartovaná rostlinami tak mohla paradoxně přispět k masovému vymírání na konci devonu před 372 miliony let, které zasáhlo mořské ekosystémy.⁶³

V období karbonu (359–300 milionů let před současností) byly dominantní složkou lesů stromovité přesličky (například *Calamites* s výškou až 20 metrů) a plavuně (například známý řád *Lepidodendrales* s druhy *Lepidodendron* a *Sigillaria*, které dosahovaly výšky až 30 metrů), kapradiny, *Medullosales* (primitivní semenné rostliny) a ranní zástupci nahosemenných rostlin kordaity (*Cordaitales*).

V období permu zhruba před 300 miliony let byly stromovité plavuně nahrazeny pokročilejšími nahosemennými jehličnanými během události známé jako „Kolaps karbonského deštěného pralesa“.⁶⁴ Klimatická změna (vznik sezonality – střídání vlhkých

57 RUBINSTEIN, Claudia, V. – GERRIENNE, Phillippe, De La PUENTE, G., S. et al., Early Middle Ordovician evidence for land plants in Argentina (eastern Gondwana), *New Phytologist*, 2010, 188(2), s. 365–369.

58 BOYCE, C., Kevin, How green was *Cooksonia*? The importance of size in understanding the early evolution of physiology in the vascular plant lineage, *Paleobiology*, 2008, 34(2), s. 179–194.

59 BECK, Charles, B., Reconstructions of *Archaeopteris*, and further consideration of its phylogenetic position, *American Journal of Botany*, 1962, 49(4), s. 373–382.

60 BOYCE, C., Kevin – HOTTON, Carol, L. – FOGEL, Marilyn, L. et al., Devonian landscape heterogeneity recorded by a giant fungus, *Geology*, 2007, 35(5), s. 399–402.

61 SIMPSON, G., B., Alastair – SLAMOVITS, Claudio, H. – ARCHIBALD, John, M., Protist diversity and eukaryote phylogeny, in: ARCHIBALD, John, M., *Handbook of the protist*, New York 2017, s. 1.

62 DELWICHE, Charles F. – TIMME, Ruth E., Plants, *Current Biology*, 21(11), s. 417–422.

63 SMART, Matthew, S. – FILIPPELLI, Gabriel – GILHOOLY, William, P. et al., The expansion of land plants during the Late Devonian contributed to the marine mass extinction, *Communications Earth & Environment* 2023, 4(449).

64 SAHNEV, Sandra – BENTON, Michael, J. – FALCON-LANG, Howard, J., Rainforest collapse triggered Pennsylvanian tetrapod diversification in Euramerica, *Geology*, 2010, 38(12), s. 1079–1082.

a suchých období)⁶⁵ vedla k fragmentaci a úhynu vlhkomilných plavuňových pralesů. Dominantní lesní dřevinou se staly odolnější jehličnany, které během permu prodělaly významné druhové rozrůznění, z něhož vzešli předchůdci řady dnešních čeledí, objevily se též cykasy a jinany. Nadvláda jehličnanů trvala až do konce křídy před 65 miliony let.

Z rané křídy před cca 135 miliony let pocházejí nejstarší známé fosilie krytosemenných (kvetoucích) rostlin, kosmopolitů, kteří dnes tvoří s cca 350 000 druhy nejpočetnější oddělení rostlin.⁶⁶ Genetické studie nicméně naznačují, že první zástupci by mohli pocházet již z konce permu před 260 miliony let.⁶⁷ Krytosemenné rostliny se vyvíjely ruku v ruce s hmyzími opylovači, zejména včelami. Během pozdní křídy začaly dominovat suchozemským rostlinným ekosystémům⁶⁸ a tuto dominanci si podržely i po masovém vymírání na konci křídy (tzv. K–T událost), které postihlo až tři čtvrtiny druhů rostlin a živočichů.⁶⁹ Kromě symbiózy s hmyzem mohla stát za triumfem krytosemenných i větší účinnost jejich fotosyntézy, dosažená díky zvýšené možnosti příjmu oxidu uhličitého modifikovanými průduchy.⁷⁰

Významné naleziště krytosemenných stromů typu *Paraphyllanthoxylon* z pozdní křídy se nachází v klikovském souvrství v Jihočeské pánvi při okraji Českých Budějovic. Stromy dosahovaly výšky přes 30 metrů a rostly v teplém, vlhkém prostředí při vodních plochách a vodotečích.⁷¹ Část fosilního kmene tohoto

taxonu je uložena v podsбірce Lesnictví Národního zemědělského muzea na zámku Ohrada.

Před 35 miliony let vznikla skupina krytosemenných rostlin zvaných trávy. S nimi se rozšířil zcela nový habitat – travnaté pláň, stepi a savany. Některé druhy trav posléze domestikoval člověk a staly se základem zemědělské revoluce.

Dnešní lesy tvoří s celkovou plochou cca čtyř miliard hektarů 80 % zemské rostlinné biomasy a jsou zodpovědné za 75 % celkové primární produkce biosféry.⁷² Celkem 45 % plochy lesů se nachází v tropickém podnebném pásu. Podle zemské šířky, ve které rostou, je můžeme zhruba rozlišit na rovníkové vlhké a suché tropické lesy a temperátní lesy s převahou krytosemenných listnáčů a tajgy severského (boreálního) pásu s převahou nahosemenných jehličnanů.

Původní lesní porosty, do jejichž vývoje nezasahuje člověk, se nazývají primární lesy. Tvoří zhruba 34 % světových lesních porostů a zabírají plochu okolo jedné miliardy hektarů a nacházejí se zejména v Brazílii, Kanadě a Rusku.⁷³ Tyto porosty se přirozeně zmlazují, jsou tedy různověké s nejstaršími stromy dosahujícími stáří několika set až tisíc let. Na tyto lesy je vázána výjimečně bohatá biodiverzita, navíc jsou daleko efektivnějším fixátorem uhlíku (tedy oxidu uhličitého) než například umělé plantáže rychle rostoucích dřevin.⁷⁴ Jejich ochrana je tedy důležitá v boji se změnami klimatu.

65 GULBRANSON, Erik, L. – MONTAÑEZ, Isabel, P. – TABOR, Neil, J. – LIMARINO, Oscar, Late Pennsylvanian aridification on the south western margin of Gondwana (Paganzo Basin, NW Argentina): A regional expression of a global climate perturbation, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 417, s. 220–235.

66 PATON, Alan – BRUMMITT, Neil – GOVAERTS, Rafael et al., Towards Target 1 of the global strategy for plant conservation: A working list of all known plant species – progress and prospects, *Taxon*, 2008, 57(2), s. 602–611.

67 LAMONT, Byron B. – TIANHUA, He, Fossil flowers of *Phyllica* support a 250 Ma origin for Rhamnaceae, *Trends in Plant Science*, 2022, 27(11), s. 1093–1094.

68 HEIMHOFER, Ulrich – HOCHULI, Peter, A. – BURLA, Stephan, New records of Early Cretaceous angiosperm pollen from Portuguese coastal deposits: implications for the timing of the early angiosperm radiation, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2007, 144, s. 39–76.

69 Vyhyňuly mimo jiné všechny druhy neptačích dinosaurů; NEUBAUER, Thomas, A. – HAUFFE, Torsten – SILVESTRO, Danielle et al., Current extinction rate in European freshwater gastropods greatly exceeds that of the late Cretaceous mass extinction, *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1), s. 97.

70 WESTBROOK, Anna, S. – MCADAM, Scott, A., M., Stomata density and mechanics are critical for high productivity: insights from amphibious ferns, *New Phytologist*, 2020, 229(2), s. 877–889.

71 VENCLOVÁ, Sandra – CHERNOMORETS, Olga – LAURIN, Jiří et al., Largest fossil logs of *Paraphyllanthoxylon*-type from the Eastern Hemisphere (Upper Cretaceous, Czech Republic), *Cretaceous Research*, 2023, 147, 105506.

72 Primární produkce je energie, kterou v ekosystému poutají primární producenti, tedy fotosyntetizující organismy. Lze ji též vyjádřit množstvím vytvořené celkové sušiny. Sekundární produkce je biomasa konzumentů. Viz Mendelova univerzita v Brně, Les jako ekosystém, heslo primární produkce sekundární produkce, dostupné online na: <https://rumex.mendelu.cz/oryx/les_jako_ekosystem/index.php/vymena-energie-latek-a-informaci-v-lesnich-ekosystemech/primarni-produkce-sekundarni-produkce/> [10. 5. 2024].

73 ANONYMUS, The State of the World's Forests 2020. In brief – Forests, biodiversity and people, Řím: 2020, s. 9.

74 MCGARVEY, Jennifer – THOMPSON, Jonathan, R. – EPSTEIN, Howard, E. et al., Carbon storage in old-growth forests of the Mid-Atlantic: toward better understanding the eastern forest carbon sink, *Ecology*, 2015, 96 (2), s. 311–317.

Strom průměrně absorbuje 10–40 kg oxidu uhličitého ročně. Závisí to však na mnoha faktorech, jako je druh, věk, lokalita, zdraví stromu a převládající klimatické podmínky. Mladé, rychle rostoucí stromy obvykle absorbují větší množství oxidu uhličitého než stromy starší, protože růst nové biomasy vyžaduje větší množství uhlíku.⁷⁵ Za 100 let své existence údajně jeden průměrný strom pohltí přibližně 1 tunu oxidu uhličitého, temperátní lesy pak každoročně pohltí 100 miliard tun uhlíku. Zároveň ale cca stejné množství uhlíku opět uvolní dýcháním a rozkladem. Lesy tak v zásadě mají nulovou bilanci.⁷⁶ Lidskou činností je však do atmosféry uvolňováno další množství oxidu uhličitého. Jen za rok 2021 činil objem vyprodukovaných emisí oxidu uhličitého ve světě 41,1 miliardy tun. V naprosté většině pocházejí tyto emise ze spalování fosilních paliv a z průmyslových procesů.⁷⁷ Pro srovnání: lesní požáry v průměru uvolní ročně do atmosféry cca 11 miliard tun oxidu uhličitého a oceány 6,12 miliardy tun (ovšem pohltí 9,3–12,6 miliardy tun oxidu uhličitého).⁷⁸

Česká republika patří k zemím s poměrně vysokou lesnatostí. Lesní pozemky pokrývají $2\,923,2 \pm 37,6$ tis. ha, což představuje $37,1 \pm 0,5$ % z celkového území státu. Nejvyšší lesnatost byla zjištěna v Karlovarském ($50,2 \pm 2,4$ %) a Libereckém kraji ($50,1 \pm 2,5$ %), nejnižší je naopak na území hl. m. Prahy ($14,5 \pm 4,4$ %). Nejvyšší plocha lesa byla evidována v kraji Jihočeském ($415,7 \pm 17,4$ tis. ha) a Plzeňském ($337,4 \pm 15,8$ tis. ha).⁷⁹ Rozloha lesů v ČR se postupně zvyšuje, a to především díky opatřením v oblasti lesního hospodářství, jako je zalesňování zemědělských pozemků a rekultivace postižených oblastí. V roce 2020 například pokrývaly lesy 33,9 % plochy Česka, v roce 2024 pak $37,1$ % plochy Česka. Za poslední čtyři roky tak lesnatost vzrostla o 8,4 %.⁸⁰

4. FOTOSYNTÉZA UTVÁŘÍ NÁŠ SVĚT

4.1 Fotosyntéza a atmosféra

Atmosféra je plynný obal Země, obsahuje však i pevnou (prach) a kapalnou složku (vodní mlha). Tvoří ji následující plyny (množství vyjádřeno v objemových procentech): dusík – 78,084 %, kyslík – 20,948 %, argon a jiné tzv. vzácné plyny – 0,935 %, oxid uhličitý – 0,04 % a další plyny ve velmi nízkých koncentracích.

V závislosti na poměru plynných složek a teplotě se atmosféra dělí na sedm vrstev s přechodovými zónami: nejnižší se nachází troposféra (a přechodová vrstva tropopauza), následuje stratosféra (a stratopauza), mezosféra (a mezopauza), termosféra (a termopauza) a exosféra. Troposféra se nachází ve výšce 0 až 9–18 km nad zemským povrchem (v rovníkových oblastech sahá výše než nad zemskými póly), obsahuje téměř $\frac{3}{4}$ hmoty atmosféry a téměř všechnu atmosférickou vodu. Probíhají v ní děje označované jako počasí. Stratosféra sahá do výše přibližně 50 km od tropopauzy. Mezosféra dosahuje výšky až 80 km od stratopauzy. Termosféra končí ve výšce okolo 1 000 km. V termosféře vzniká polární záře. Exosféra se rozprostírá od termopauzy do výše 30–40 000 km.⁸¹

4.1.1 Rostliny neposkytují jen kyslík na dýchání

Slunce vysílá k Zemi sluneční záření o teplotě cca 5 500 °C a vlnové délce 180 až 4 000 nanometrů. Na vnějším okraji atmo-

75 EcoTree, dostupné online na: <<https://ecotree.green/en/how-much-co2-does-a-tree-absorb>> [28. 6. 2024].

76 MUSSELMAN, Robert, C. – FOX, Douglas, G., A review of the role of temperate forests in the global CO₂ balance, Journal of the Air & Waste Management association, 1991, 41(6), s. 797–807.

77 Fakta o klimatu, Vývoj světových emisí CO₂, dostupné online na: <<https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-co2-svet-vyvoj>> [10. 5. 2024].

78 XI-LIU, Y., U., E. – QING-XIAN, G., A., O., Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions, Advances in Climate Change Research, 2018, 9(4), s. 243–252.

79 MÁŠLO, Jan – ADOLT, Radim – KUČERA, Miloš – KOHN, Ivo, Národní inventarizace lesů v České republice – výsledky třetího cyklu 2016–2020, Brandýs nad Labem 2023.

80 Tamtéž.

81 KRÁLOVÁ, Magda, Vrstvy v atmosféře, Techmania Science center, Eduportál, dostupné online na:

<<https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/atmosfera/vrstvy-v-atmosfere>> [6. 9. 2024].

82 MONTALUISA-MANTILLA, María, S. – GARCÍA-ENCINA, Pedro – LEBRERO, Raquel et al., Botanical filters for the abatement of indoor air pollutants, Chemosphere, 2023, 345, 140483.

83 Podrobněji viz např. KAVKA, Bohumil – ŠINDELÁŘOVÁ, Jaroslava, Funkce zeleně v životním prostředí, Praha 1978.

84 ZHANG, Zhe – LV, Yingmin – PAN, Huitang, Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks, 2013, 12(3), s. 323–329.

sféry dopadá s energií $1\,365\text{ W/m}^2$, k zemskému povrchu však proniká jen polovina této hodnoty. Část záření se v atmosféře odrazí zpět do vesmírného prostoru, část je pohlcena či rozptýlena.

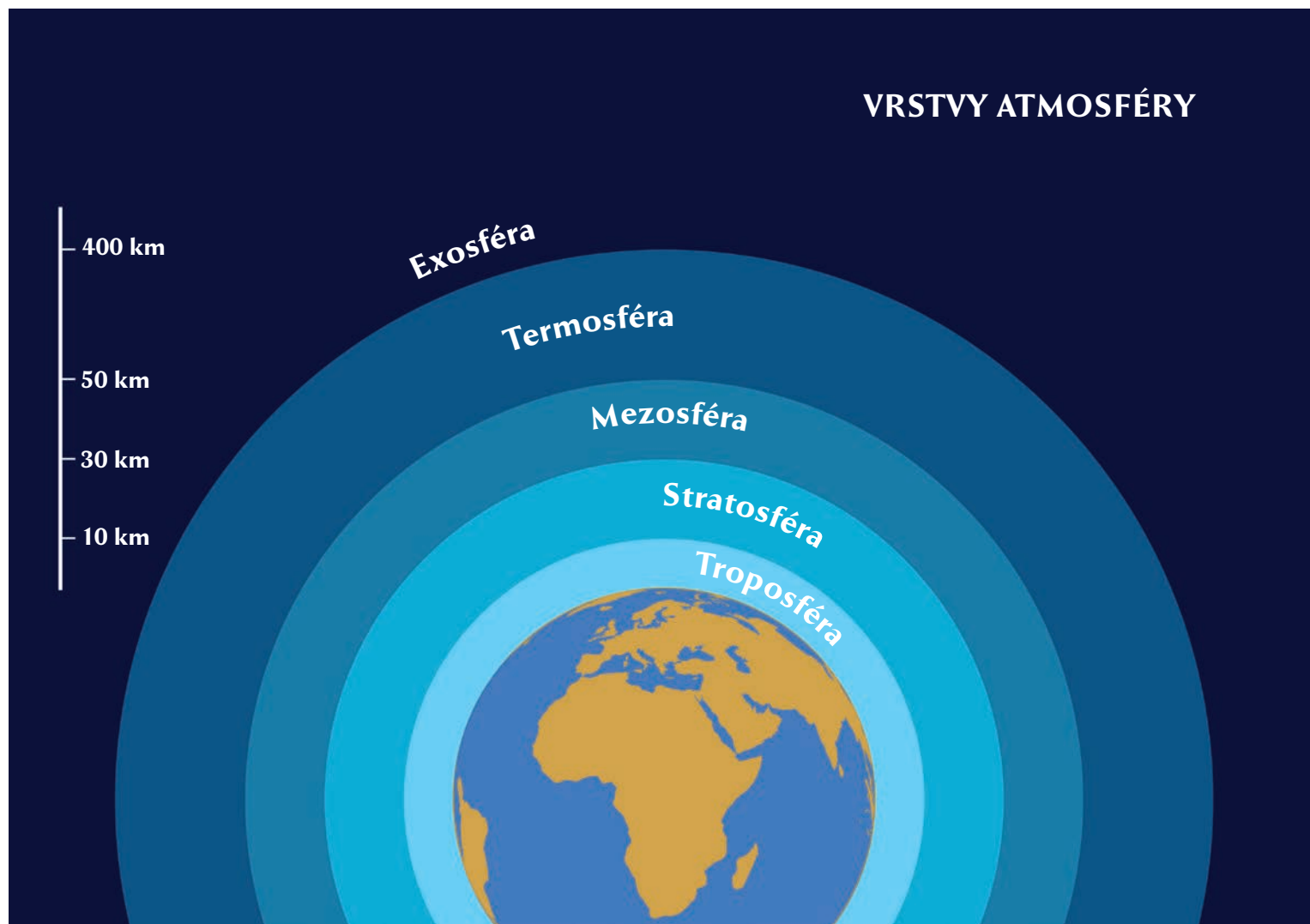
Z hlediska života na Zemi je zásadní pohlcení až 99 % ultrafialového záření (UV) ve vrstvě nazývané ozonoféra, která se nachází ve výšce mezi 10 až 50 km od zemského povrchu. Ozonoféra zcela neutralizuje nejagresivnější složku UV záření, známou jako UV C (vlnová délka 180 až 280 nm). Ozonová vrstva je tvořena ozonem (trikyslíkem) O_3 , který vzniká při rozpadu molekul kyslíku O_2 v důsledku UV záření či elektrických výbojů (blesky). Z podstaty složení ozonoféry vyplývá, že by nemohla existovat bez masivní produkce kyslíku rostlinami. Rostliny pro-

dukující kyslík nám tak neumožňují „jen“ dýchat, ale také nás chrání před smrtícím zářením z kosmu.

Kromě produkce kyslíku jsou rostliny efektivními eliminátory polutantů ovzduší, zejména těkavých organických složek a prachu. Vzhledem k této schopnosti jsou využívány jako experimentální botanické filtry pro použití v uzavřených prostorech.⁸²

Velmi významný je také zvlhčující a ochlazující efekt vegetace prostřednictvím evapotranspirace, a to nejen z hlediska globálního cyklu vody, ale také v prostředí měst, která se zejména v letních měsících mění v extrémní tepelné ostrovy. I poměrně malá plocha zeleně má výrazný vliv na mikroklima.⁸³ Ve svém bezprostředním okolí dokáže snížit teplotu vzduchu až o více než pět stupňů a zvýšit vlhkost vzduchu o více než osm procent.⁸⁴

Vrstvy atmosféry



Cyklus uhlíku
(autor ilustrace: Mariana Jiráková)



4.1.2 Vázání oxidu uhličitého a koloběh uhlíku

Pro existenci života na Zemi je výskyt oxidu uhličitého v ovzduší naprosto nezbytný. Významně se podílí na přirozeném skleníkovém efektu atmosféry, díky kterému jsou na zemském povrchu vhodné teplotní podmínky pro život. Přílišné množství oxidu uhličitého však způsobuje zesílení tohoto efektu, což vede k nežádoucímu globálnímu oteplování a změně klimatu.

Historie hladiny oxidu uhličitého v atmosféře je provázena řadou výkyvů. Díky studiu vzorků ledu získaných z hloubkových vrtů v arktických oblastech mohou vědci zmapovat koncentraci oxidu uhličitého v atmosféře až statisíce let zpět. Tyto záznamy ukazují, že se koncentrace tohoto plynu historicky pohybovala mezi 0,018 % a 0,028 %, což odpovídá přirozeným cyklům ledových dob a meziledových období, kdy se planeta přirozeně ochlazovala a oteplovala. Od konce 18. století, kdy začala průmyslová revoluce, však lidské aktivity, především spalování fosilních paliv, odlesňování a intenzivní průmyslová výroba, vedly k dramatickému nárůstu koncentrace tohoto plynu.⁸⁵ V roce 2023 byla překročena hranice 420 ppm, což je daleko nad přirozeným rozmezím pozorovaným během posledních 800 000 let.⁸⁶ Tento nárůst má řadu negativních dopadů a mění klimatické vzory po celém světě.

Oxid uhličitý obsažený v ovzduší je pro fotosyntézu nepostradatelný. Jeho zvýšená hladina má na tento proces zásadní vliv. Ovlivňuje rychlost fotosyntézy, a tedy i fixaci uhlíku v listech, a produkci biomasy. Suchozemská flóra tak každoročně „vychytá“ (zafixuje) 120×10^{15} g uhlíku (440×10^{15} g oxidu uhličitého, tedy 440 gigatun) z množství 730×10^{15} g (tedy 730 gigatun) uhlíku obsaženého v atmosféře ve formě oxidu uhličitého.⁸⁷

Určité druhy rostlin (zejména tzv. C3 rostliny, které tvoří většinu rostlin v mírných klimatických oblastech) reagují na vysokou

koncentraci oxidu uhličitého v ovzduší pozitivně. Mohou zvýšit fotosyntetickou aktivitu o 40–50 %, a tím urychlit růst, vývoj, a pokud se jedná o zemědělskou plodinu, také výnos.⁸⁸ Můžeme tak hovořit o adaptaci rostlin, která jim umožňuje přežít, a dokonce i prosperovat v nových klimatických podmínkách. Je však důležité mít na paměti, že zvýšená úroveň oxidu uhličitého zlepšuje fotosyntetickou efektivitu jen do určité míry, a to pouze pokud jsou ostatní růstové podmínky (světlo, voda, živiny, teplota) optimální.⁸⁹ Zvýšená koncentrace oxidu uhličitého ovlivňuje i hospodaření rostliny s vodou. Má vliv na uzavírání průduchů listů a tím zamezuje vypařování vody neboli transpiraci, což může být výhodné v suchých oblastech a může podpořit růst biomasy, i když zdroje vody jsou omezené.

Na druhou stranu zvýšená hladina oxidu uhličitého a jeho působení na fotosyntézu přináší řadu negativních účinků. Může sice významně působit na rychlost fotosyntézy, avšak obsah živin, jako jsou proteiny, vitamíny a minerály, je často snížen a celkově plodiny mohou mít nízkou nutriční hodnotu.⁹⁰ Další negativum, které může nastat, je omezení fotosyntézy, a to z důvodu nasycení schopnosti rostliny absorbovat oxid uhličitý. Proces růstu a vývoje rostliny se pak zastavuje. Zvýšená hladina oxidu uhličitého také zapříčiňuje změny v ekosystémech. Invazivní druhy mohou těžit z těchto podmínek na úkor původních druhů, což vede k narušení přirozených ekosystémů a ztrátě biodiverzity.

Je však velmi důležité zdůraznit, že ačkoliv adaptace plodin může zlepšit produktivitu a výnosy, z dlouhodobého hlediska představuje vysoká hladina oxidu uhličitého pro naši Zemi velmi zásadní problém, s nímž se pojí globální oteplování, klimatické změny, ztráta biodiverzity a změna rostlinných společenstev.

Na druhou stranu se v poslední době stále častěji objevují na vědeckém poli názory, že lidé nejsou jediným viníkem vzrůstajících hladin oxidu uhličitého – může se jednat o součást přirozené fluktuace, kterou ale lidská činnost významně urychluje.

85 NÁTR, Lubomír, Země jako skleník: proč se bát CO₂? Průhledy, Praha 2006.

86 CO2 LEVELS.ORG, dostupné online na: <<https://www.co2levels.org/>> [21. 6. 2024].

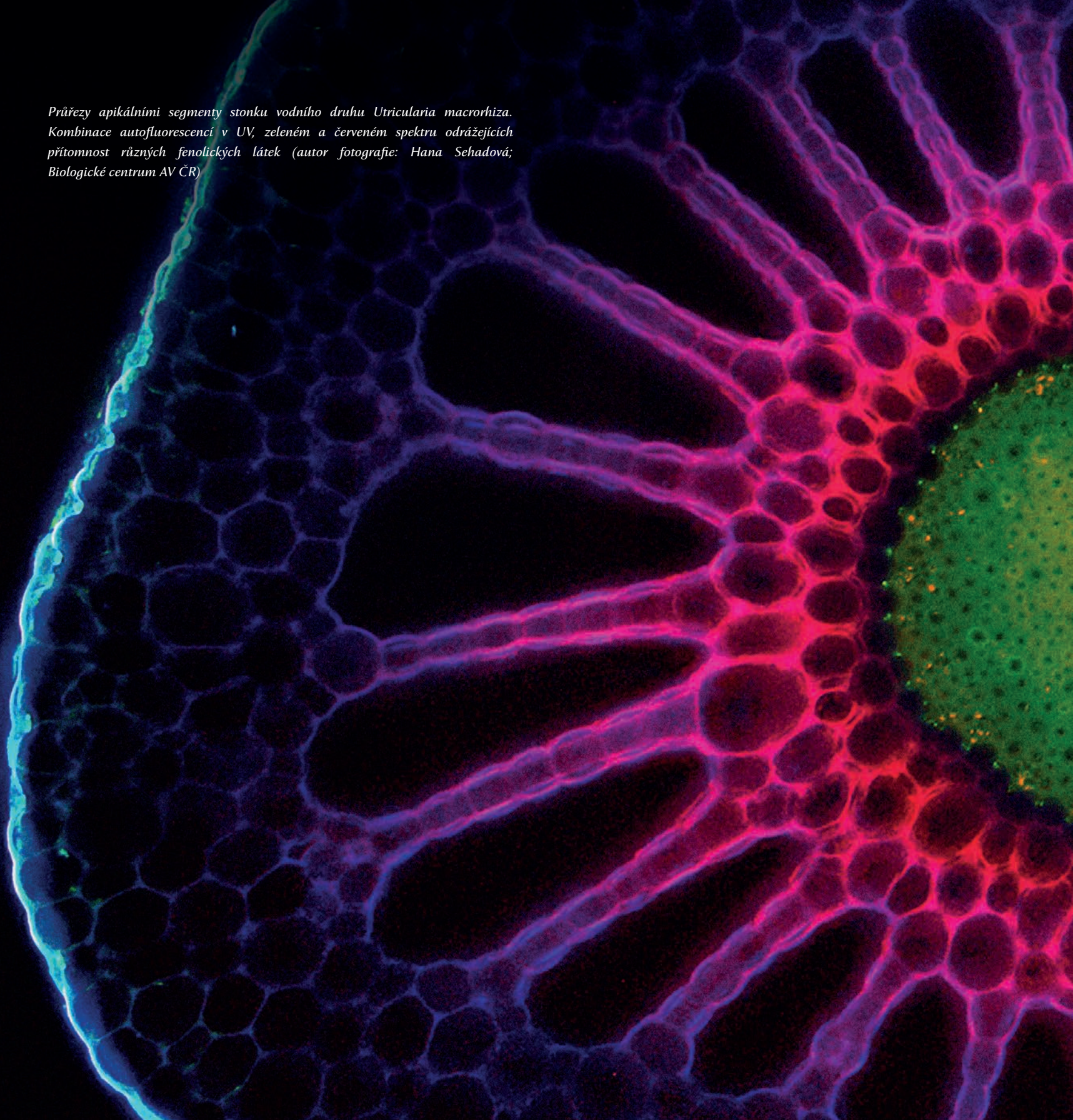
87 HETHERINGTON, Alistair, M. – WOODWAER, Ian, F., The role of stomata, c. d., s. 901.

88 THOMPSON, Michael – GAMAGE, Dananjali – HIROTSU, Naoki et al., Effects of Elevated carbon dioxide on photosynthesis and carbon partitioning: A perspective on root sugar sensing and hormonal crosstalk, Frontiers of Physiology, 2017, 8, 578.

89 NÁTR, L., Země jako skleník, c. d.

90 NÁTR, Lubomír, Fotosyntetická produkce a výživa lidstva. Přírodní vědy, Praha 2002.

Průřezy apikálními segmenty stonku vodního druhu *Utricularia macrorhiza*.
Kombinace autofluorescencí v UV, zeleném a červeném spektru odrážejících
přítomnost různých fenolických látek (autor fotografie: Hana Sehadová;
Biologické centrum AV ČR)





4.2 Fotosyntéza staví a boří

4.2.1 Fotosyntéza staví – biogenní horniny

Kromě vlivu na atmosféru má fotosyntéza přímý vliv i na složení zemské kůry a tvářnost jejího povrchu (tzv. georeliéf). Pozůstatky fotosyntetizujících organismů bohaté na uhlík se totiž rozhodující měrou podílely na vzniku mohutných vrstev usazených (sedimentárních) hornin, kterým se pro jejich biologický původ říká biogenní či organogenní sedimenty.⁹¹

Jedná se obvykle o jemnozrnné sedimenty, které se podle převládajícího chemického složení dělí na vápence (a odvozené dolomity, viz níže), diatomit (ze skupiny silicitů) a kaustobiolity (uhlí, ropné (hořlavé) břidlice a také ropa, asphalt, rašelina a slatina).⁹² Dále sem patří fosfority čili guáno, tedy vrstvy trusu

(a kostí) ptáků či netopýrů. Ty ale nejsou produktem fotosyntetizujících organismů, a tak se jim nebudeme blíže věnovat.

Vápenec tvoří společně s dolomitem čtyři pětiny usazených hornin na Zemi.⁹³ Vápence často vznikají z akumulace organických zbytků, jako jsou schránky měkkýšů nebo organismy, které vykonávaly fotosyntézu, například některé druhy řas a korálové polypy. Tyto organismy vytvářejí kalcit, který je hlavní složkou vápenců.⁹⁴ Vápence a dolomity jsou základem mnoha krasových oblastí a pohoří po celém světě. Jako příklad můžeme uvést Slovenský, Český a Moravský kras, Francouzské středohoří, Jižní vápencové Alpy atd. Například devonské vápence tvoří významnou část barrandienu, oblasti proslulé množstvím paleontologicky cenných lokalit z prvohor, proslavené zejména výzkumem Joachima Barranda.

Krasové jevy v jeskyni Domica. Jeskyně Domica je největší jeskyní Slovenského krasu. Byla vytvořena ve vápencích středního triasu (autor fotografie: Petr Rajlich)

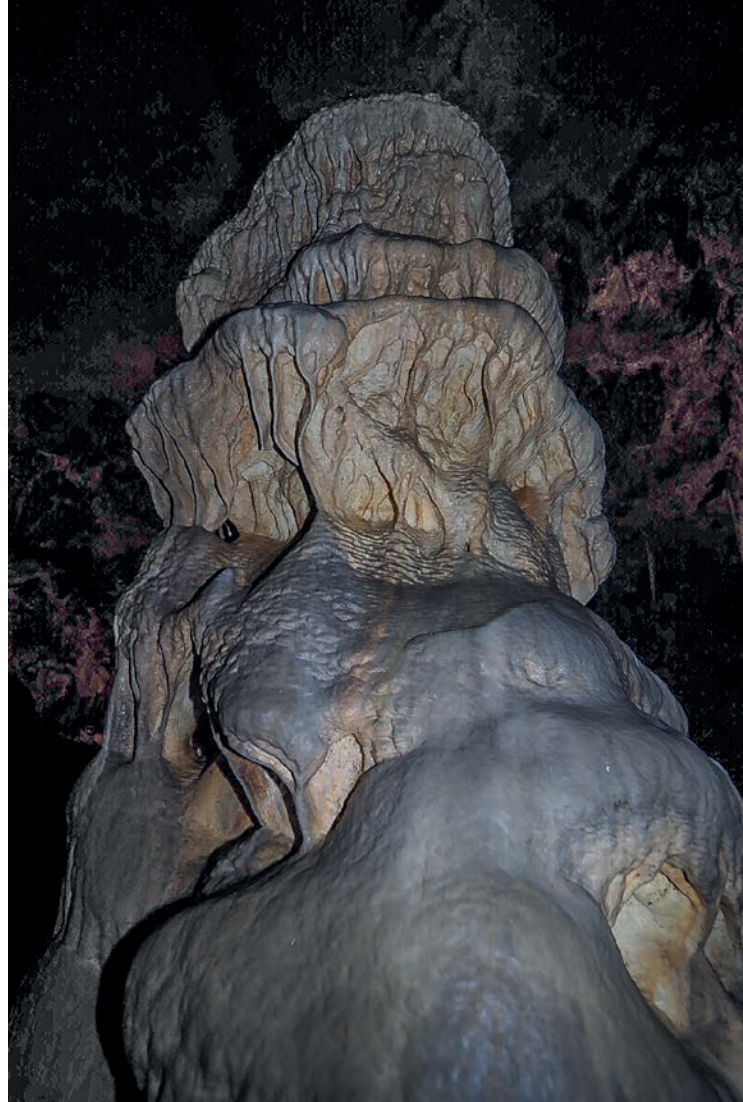


Diatomit čili křemelina vzniká nahromaděním křemenných schránek rozsivek, které tvoří alespoň 40 % jejího objemu. V Česku se vyskytuje především v Třeboňské pánvi, v Borovanech u Českých Budějovic se komerčně těží. Může se jednat o nebezpečnou sypkou horninu (tzv. diatomová zemina, bahno či jíl) nebo pevnou formu (diatomové břidlice).⁹⁵

Rozsivky (někdy též diatomy, čeled' Diatomae – odtud název horniny) jsou jednobuněčné organismy, které bývají tradičně řazeny mezi hnědé řasy. Jsou mimořádně významnými primárními producenty, kteří se spolu se sinicemi zasloužili o vznik kyslíkaté atmosféry na Zemi. Tvoří hlavní složku mořského planktonu a dle různých zdrojů jsou zodpovědné za 20⁹⁶–40 %⁹⁷ roční primární produkce oceánů. Tělo rozsivky chrání schránka zvaná frustula. Skládá se ze dvou polovin, které do sebe zapadají jako víko na krabici. Schránky tvoří polymerizovaný oxid křemičitý (SiO₂) a mohou být nejrůzněji tvarované a skulptované. Právě z těchto schránek vzniká diatomit. Křemelina se využívá jako filtrační a také absorpční materiál. Její absorpční vlastnosti mohou pomoci vázat a odstranit toxiny a odpadní látky z gastrointestinálního traktu. Slouží též jako ochrana před vnitřními i vnějšími parazity a škůdci. Úlomky schránek rozsivek jsou totiž velice ostré a mohou poranit drobný hmyz. Křemelina se například dává slepicím jako materiál k popelení (hubení čmelíků) nebo se jí obsypávají květináče a záhony (ochrana rostlin před lezoucími hmyzem).⁹⁸

Další skupinou biogenních sedimentů odvozujičích původ u fotosyntetizujících organismů jsou kaustobiolity. Kaustobiolity mají pro člověka mimořádný hospodářský význam – uhlí a ropa patří mezi tzv. fosilní paliva a jsou důležitou energetickou surovinou.

V současnosti je uhlí surovinou pro 1/3 celosvětové produkce elektřiny,⁹⁹ v Česku činil v roce 2022 podíl uhelných paliv na hrubé



Krasové jevy v Javoříčských jeskyních. Jeskynní komplex v Olomouckém kraji vznikl v devonských vápencích (autor fotografie: Petr Rajlich)

91 Ústav pro archeologii, Základy geologie pro archeology, přednáška, dostupné online na:

<https://upa.ff.cuni.cz/wp-content/uploads/sites/171/2023/02/GeologieFF-3exogenni-sily-C.pdf> [20. 5. 2024].

92 Tamtéž.

93 Hornina vzniklá vysrážením nasycených solných roztoků nebo přeměnou vápence – dolomitizací. Obsahuje nejméně 50 % minerálu dolomitu CaMg(CO₃)₂. Průmyslově zpracováváný dolomit musí mít podíl CaMg(CO₃)₂ alespoň 90 %.

94 TARBUCK, Edward, J., et al., Earth: an introduction to physical geology. Upper Saddle River 2005.

95 Česká geologická služba, Geologická encyklopedie online, dostupné online na: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl> [10. 5. 2024].

96 MALVIYA, Shruti – SCALCO, Eleora – AUDIC, Stéphane et al., Insights into global diatom distribution and diversity in the world's ocean, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(11), E1516–E1525.

97 FIELD, Christopher, B. – BEHRENFELD, Michael, J. – RANDERSON, James, T. et al., Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components, Science 1998, 281, s. 237–240.

98 SECKBACH, Josef – GORDON, Richard, Diatoms: Fundamentals and Applications, Hoboken 2019, s. 471–536.

99 International energy agency (IEA), dostupné online na: <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal> [6. 9. 2024].

výrobě elektřiny dokonce 44 %.¹⁰⁰ Uhlí se užívá rovněž k vytápění a ohřevu vody (technologické teplo) a je primární surovinou pro řadu odvětví chemického průmyslu. Vzniklo ze dřeva, které bylo uloženo v anaerobním (bezokyslíkatém) vodním prostředí tropických slatin a jezer, kde nízká hladina kyslíku a zvýšený tlak bránily jeho přirozenému rozkladu (oxidaci – hnití) a rostlinný materiál přecházel od trouchnivění přes rašelinění k prouhelňování za vzniku hnědého a posléze černého uhlí. Je složeno především z uhlíku, vodíku a kyslíku, v menším množství obsahuje dusík, síru a radioaktivní příměsi. Podle obsahu uhlíku se dělí na lignit (cca 65–70 % obsah uhlíku),¹⁰¹ hnědé uhlí (cca 75 % uhlíku), černé uhlí (72–92 % uhlíku) a antracit (více než 92 % uhlíku).¹⁰² Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se zvyšuje hodnota uhlí jako paliva.

Hnědé uhlí a jeho podtyp lignit obsahuje vyšší podíl vody (a z prostředí další vodu snadno absorbuje). Jako palivo je tedy méně kvalitní než uhlí černé. Hnědé uhlí obsahuje také více síry – až 5 %, která má korozivní účinky na kotle a komíny.¹⁰³ Ukládalo se v druhohorách a třetihorách. Černé uhlí a jeho podtyp antracit pochází z období prvohor. Vznikalo především v období zvaném karbon a perm před 354–286 miliony let.¹⁰⁴ Kromě paliva je využíváno i v chemickém průmyslu.

Ropa je tmavá hořlavá tekutina tvořená směsí uhlovodíků (organické sloučeniny tvořené uhlíkem a vodíkem), obsahuje též kyslík, dusík a síru. Zdaleka největší podíl představuje uhlík – až 87 %. Podle převažující hypotézy ropa vznikla během několika

miliónů let, během nichž se odumřelé zbytky mořského planktonu vlivem sedimentace a tektoniky posunuly dva až pět kilometrů hluboko pod dno oceánů. Tam došlo k jejich rozpadu působením zvýšené teploty a tlaku (tzv. termogenický rozpad).¹⁰⁵ Za těchto podmínek se organické zbytky přeměnily nejprve na kerogen a ten pak za teplot 60–120 °C na ropu (při cca 100 °C pak začíná tvorba zemního plynu). Existuje i ropa pocházející z anorganických zdrojů, avšak její množství je zanedbatelné.¹⁰⁶ Ropa je využívána u každé masové výroby, přepravy a zemědělské produkce. Oxid uhličitý ze spalování ropy tvoří cca čtvrtinu všech celosvětových emisí skleníkových plynů. Spolu s uhlím je tak ropa největším generátorem skleníkových plynů uvolňovaných v důsledku lidské činnosti. V roce 2023 bylo více než 60 % světové elektřiny vygenerováno spalováním fosilních paliv.¹⁰⁷ Celkem 15 % fosilních paliv je spotřebováno na produkci, dopravu a uskladnění potravin.¹⁰⁸

Poslední biogenní látkou, někdy řazenou mezi minerály, jindy mezi organogenní sedimenty, je fosilní pryskyřice zvaná jantar. Většina jantaru je stará okolo 50 miliónů let a pochází z třetihorních jehličnanů. Je však znám i vzorek z prvohorního karbonu starý až 320 miliónů let.¹⁰⁹ Uplatňuje se především ve šperkařství. Typicky má okrovou, hnědou až černou barvu, nejcennější je nádherná modrá odrůda z Dominikánské republiky, která pochází z vyhynulého druhu kurbarylu *Hymenaea protera*.¹¹⁰ Zhruba 10 % vzorků jantaru obsahuje výborně zachované fosilie, od mikrofosilií pylových zrn a extrémně jemných struktur, jako jsou květy či

100 BUFKA, Aleš – MODLÍK, Miloslav – DOKOUPIL, Dušan, Ministerstvo průmyslu a obchodu, Energetická statistika, Uhlí v České republice 2012–2022, Ministerstvo průmyslu a obchodu, s. 3, dostupné online na: <https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/statistika/tuha-paliva/2024/2/Uhli-2012-2022_2.pdf> [6. 9. 2024].

101 Energy education, dostupné online na: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal_types> [6. 9. 2024].

102 Česká geologická služba, Geologická encyklopedie online, dostupné online na: <<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>> [6. 9. 2024].

103 Optimtop, dostupné online na: <<https://www.optimtop.cz/vyhody-a-nevyhody-hnedeho-uhli/>> [9. 9. 2024].

104 Česká geologická služba, c. d. [8. 9. 2024].

105 Masarykova univerzita v Brně, vznik ropy, prezentace, dostupné online na: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/G9301/um/panevka_ropa_2012.pdf> [10. 5. 2024].

106 SHERWOOD, Lollar, B. – WESTGATE, T., D. – WARD, J., A. et al., Abiogenic formation of alkanes in the Earth's crust as a minor source for global hydrocarbon reservoirs, *Nature*, 2002, 416(6880), s. 522–524.

107 MAGUIRE, Gavin, Fossil fuels still dominate global powersystem, Reuters, 30. listopadu 2023, dostupné online na: <<https://www.reuters.com/markets/commodities/fossil-fuels-still-dominate-global-power-systems-2023-11-30/>> [15. 4. 2024].

108 MISHRA, Stuti, Big oil is coming for dinner: Fossil fuel are entrenched across global food system, report warns, *Independent*, 2. 11. 2023, dostupné online na: <<https://www.independent.co.uk/climate-change/news/food-processing-carbon-emissions-climate-b2439739.html>> [15. 4. 2024].

109 GRESHKO, Michael, How amber creates exquisite fossils, *National Geographic*, dostupné online na: <<https://www.nationalgeographic.com/science/article/what-is-amber-fossils-science>> [20. 5. 2024].

110 Kurbaryl je rod tropických stromů z čeledi bobovité. Dnešní druhy produkují pryskyřici známou jako kopál, která se dodnes používá jako přísada do laků užívaných při výrobě houslí a restaurování.

vajíčka měkkýšů a hmyzu,¹¹¹ přes členovce až po drobné obojživelníky¹¹² nebo opeřený ocas drobného dinosaura.¹¹³ Tyto fosilie sice neobsahují DNA,¹¹⁴ vynikají však uchováním jemných anatomických struktur a v případě živočichů i obsahu trávicího systému (včetně střevních bakterií) či krevních elementů. Známý jsou i patogeny (viry, bakterie) zalité v jantaru s těly svých hostitelů.¹¹⁵

Fotosyntetizující organismy tak prostřednictvím biogenních hornin nejen „staví“ náš svět, ale prostřednictvím fosilií uchovávaných ve vápenci a jantaru nám otevírají malé okno, kterým můžeme nahlédnout do světa dávno zmizelých forem života.

4.2.2 Fotosyntéza boří – eroze a vznik půd

Fotosyntetizující formy života se kromě tvorby hornin podílejí i na zvětrávání (tzv. erozi) hornin a nerostů, a to jak mechanicky (prostým rozrušováním kořeny), tak chemicky pomocí látek vylučovaných kořenovým vlášením. Rozrušováním tzv. mateční horniny a minerálů se vytváří půda, nejsvrchnější část suchozemské zemské kůry. Půda nejen vzniká za přispění rostlin, ale rostliny ji také obohacují o humus, úrodnou složku tvořenou odumřelými částmi rostlin (a živočichů). Humus dodává do půdy minerální látky potřebné pro růst. Z hlediska života na Zemi je nejdůležitější vlastností půd jejich úrodnost. Úrodnost půdy je její schopnost poskytovat rostlinám takové životní podmínky, které mohou uspokojit jejich požadavky na vodu, živiny a půdní vzduch po celé vegetační období, a tak zabezpečit jejich úrodu. Je to souhrnná vlastnost, která je dána celým souborem fyzikál-

ních, biologických a chemických charakteristik celého půdního profilu.¹¹⁶

Půdy se podle chemického složení dělí na řadu typů s různou úrodností. Mezi nejúrodnější půdy v Česku patří černozemě a hnědozemě, mezi méně úrodné pak např. glejové půdy a arenosoly. Černozemě vznikly v raných obdobích poledové doby z mateční horniny spraše. Hlavním procesem při jejich vzniku byla intenzivní humifikace pod tehdy stepní vegetací. Patří mezi reliktní půdy dodnes uchovávané díky zemědělské kultivaci. Typicky se vyskytují na jižní Moravě a v části Polabí. Využívají se k pěstování náročných plodin, jako je kukuřice, pšenice či cukrovka.¹¹⁷

Hnědozemě jsou typické pro pahorkatiny, vznikaly pod původními dubohabrovými lesy. Hlavním procesem při jejich vzniku je illimerizace, tj. ochuzování svrchní části profilu o jílnaté částice, které jsou vodou přemísťovány do hlubších vrstev. Oproti černozemím jsou méně náchylné na vysychání. Využívají se pro pěstování náročných obilovin (pšenice, ječmen), cukrovky či vojtěšky.¹¹⁸

Glejové půdy se vyskytují v údolních nivách a zamokřených územích. Vznikají glejovým půdotvorným procesem. Jeho podstatou je redukce sloučenin železa podmíněná nedostatkem vzduchu při současném zvýšení organických látek a rozkladu prvotních minerálů vlivem vysoké úrovně hladiny podzemní vody.

Arenosoly jsou extrémně propustné a vysychavé a patří k půdám s nejnižší přirozenou úrodností.¹¹⁹

Nejpodrobnější půdní mapu Česka můžete nalézt na stránkách České geologické služby,¹²⁰ klasifikací půd vztažených k podmínkám Česka se ve své práci podrobně zabývají například Zádorová & Penížek 2020.¹²¹

111 XING, Lida – WANG, Donghao – LI, Gang et al., Possible egg masses from amphibians, gastropods, and insects in mid-Cretaceous Burmese amber, *Historical Biology*, 2021, 33(7), s. 1043–1052.

112 DAZA, Juan, D. – STANLEY, L., Edward – BOLET, Arnau et al., Enigmatic amphibians in mid-Cretaceous amber were chameleon-like ballistic feeders, *Science*, 2020, 370(6517), s. 687–691.

113 Tento dinosaurus ale nebyl žádný obr. Jednalo se o mládě opeřeného bipedního predátora ze skupiny maniraptora, které bylo s délkou cca 15 cm velké jako vrabec. Své největší slávy dosáhl maniraptorů v podobě dnešních ptáků. Podrobnosti viz LAMBERTZ, Markus, Phylogenetic placement, developmental trajectories and evolutionary implications of a feathered dinosaur tail in Mid-Cretaceous amber, *Current Biology*, 2017, 27(6), s. 215–216.

114 Doposud byly získány jen jednotlivé aminokyseliny z fosilií hmyzu, viz BARTHEL, Hans, Jonas, Soft tissue preservation in amber, 2022. PhD Thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn; PERIS, David, et al. DNA from resin-embedded organisms: Past, present and future, *PLoS one*, 2020, 15.9: e0239521.

115 PERIS, David – JANSSEN, Kathrin – BARTHEL, H., Jonas et al., DNA from resin-embedded organisms: Past, present and future, *Public Library of Science*, 2020, 15(9), e0239521.

116 SMOLOVÁ, Irena, Půdní poměry ČR, Univerzita Palackého v Olomouci, dostupné online na: <<https://geography.upol.cz/soubory/lide/smolova/GCR1/Pudni%20pomery%20text.pdf>> [15. 4. 2024].

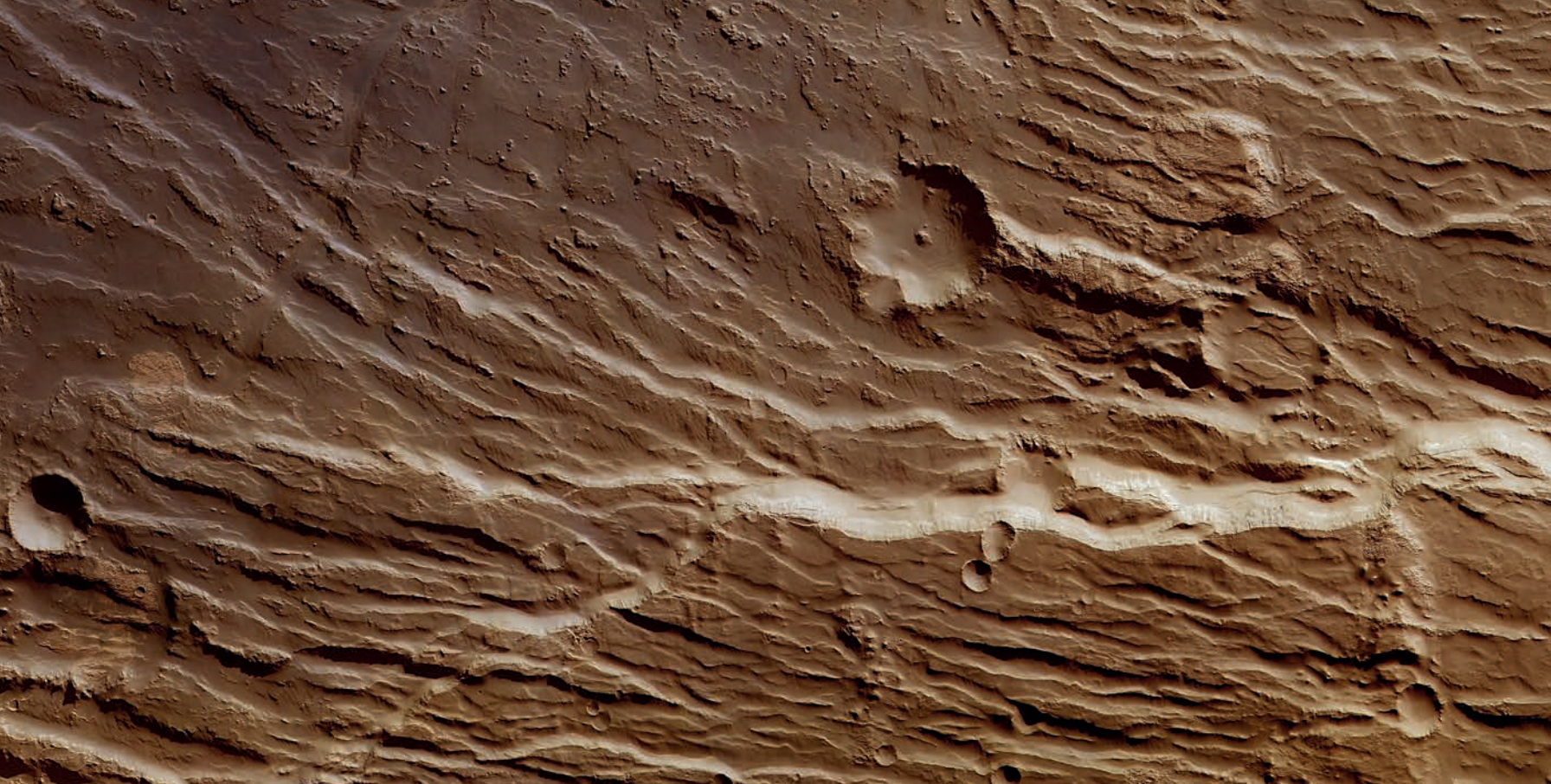
117 Tamtéž.

118 Tamtéž.

119 Tamtéž.

120 Česká geologická služba, půdní mapa 1 : 50 000, dostupné online na: <<https://mapy.geology.cz/pudy>> [15. 4. 2024].

121 ZÁDOROVÁ, Tereza – PENÍŽEK, Vít, *Základy půdní klasifikace I.*, skript, Praha 2020.



Povrch planety Mars (autor fotografie: Evropská kosmická agentura; VisualHunt; CC BY-SA 3.0)

4.2.3 Jak by vypadal svět bez fotosyntézy

Jak jsme se dozvěděli v předchozích kapitolách, drtivá většina života na Zemi je závislá na zelené fotosyntéze produkující kyslík. Rostliny syntetizují organické látky z vody a anorganického uhlíku. Jsou primárními producenty, kteří tvoří základ celé potravní pyramidy. Na rostlinné produkci závisí konzumenti, tedy téměř všichni živočichové a nefotosyntetizující organismy. Konzumenti využívají ke stavbě svých těl uhlík ve formě organických sloučenin – sacharidů, bílkovin a tuků. Ty získávají z rostlin a na dalších úrovních potravní pyramidy z jiných živočichů. Bez rostlin by došlo k degradaci a zastavení tvorby půd a rozpadu celého potravního řetězce.

Rostliny rovněž produkují kyslík, který potřebuje většina organismů k dýchání. Bez kyslíku by ovšem neexistovala ani ozonová vrstva, chránící povrch planety před smrtící radiací z vesmíru. Vysoký obsah oxidu uhličitého z vulkanické činnosti, který by rostliny nespotřebovávaly, by vytvořil silný skleníkový efekt. Rostliny

rovněž regulují koloběh vody prostřednictvím evapotranspirace a vytvářejí tak uzavřený systém s minimálními ztrátami. Kombinace ztráty rostlinstva a masivního skleníkového efektu by vedla k velkým vodním ztrátám a voda by se na povrchu stala vzácnou.

Výsledkem všech výše uvedených faktorů by byl zánik celé biosféry v současné podobě. Na Zemi by panovaly extrémní podmínky a život by se patrně omezil jen na povlaky anaerobních chemotrofních bakterií, které by byly základem potravního řetězce pro vyšší organismy s velmi jednoduchou stavbou těla. Veškerý život by patrně přežíval pouze pod vrstvou hornin a ve velkých hloubkách pod vodní hladinou mimo dosah UV záření. Země bez rostlinného pokryvu by byla holá s obnaženým skalním podložím a vrstvami prachu, bez půdy. V obecných rysech by připomínala pustou krajinu Marsu či Měsíce s tím, že na rozdíl od těchto těles by si větší Země díky dostatečně silné gravitaci uchovala atmosféru. Ta by ale složením připomínala prvotní atmosféru naší planety (viz kapitola 4.3, Kde se vzala fotosyntéza) a pro současný život by byla toxická.



5. FOTOSYNTÉZA VE SLUŽBÁCH ČLOVĚKA

5.1 Malá galerie objevitelů fotosyntézy

První klíčové objevy, které položily základ k pozdějšímu hlubšímu porozumění procesu fotosyntézy, se uskutečnily v rozmezí 17. až 19. století. Zásahu na nich měla především šestice badatelů, jejichž osobnosti a dílo vám blíže představíme níže. Jednalo se o Jana van Helmonta, Josepha Priestleyho, Jana Ingenhousze, Jeana Senebiera, Nicolase-Théodora de Saussurea a Julia Roberta von Mayera.

V souvislosti s touto slavnou šesticí se sluší zmínit ještě anglického duchovního a badatele v oblasti fyziologie Stephena Halesa (1677–1761). Svými experimenty prokázal schopnost rostlin transportovat vodu a postuloval, že rostliny pravděpodobně přijímají část výživy ze vzduchu a světlo využívají jako zdroj energie.

Biochemická podstata procesu fotosyntézy nicméně zůstávala záhadou až do 60. let 20. století. Teprve série experimentů z let 1960–1965 prokázala existenci dvou fotosystémů I a II – jejich mikrostruktura na téměř atomární úrovni byla popsána mezi lety 2001–2002 německým týmem pod vedením Horsta Witta a Wolfganga Saengera.¹²²

Jan van Helmont (Jean-Baptiste van Helmont, 1580–1644)

Žil na přelomu 16. a 17. století ve Vlámku v nynější Belgii. Narodil se do bohaté šlechtické rodiny, což mu zajistilo finanční nezávislost. Studoval v belgické Lovani, kde získal doktorát z medicíny. Okruh jeho zájmů byl ale mnohem širší. Zabýval se filozofií, teologií, geografii a právem, jeho největším koníčkem byla chemie.

Van Helmont neměl o existenci fotosyntézy tušení, provedl ale prvotní výzkum, který pozdější objevitele fotosyntézy inspiroval. V rámci jednoduchého experimentu zasadil vrbu o váze

2,2 kg do vysušené zeminy o hmotnosti 90 kg. Poté ji pět let zaléval pouze filtrovanou dešťovou nebo destilovanou vodou. Po pěti letech vrbu vyjmul ze země a znovu vše zvážil. Zjistil, že strom vážil 77 kg, ale půda byla lehčí pouze o 57 g. Z čeho tedy strom vyrostl? Van Helmont došel k mylnému závěru, že

Jan van Helmont
(autorem všech ilustrací
vědců je Mariana Jiráková)



z vody.¹²³ Teprve jeho následovníci objevili, že zdrojem stavebního materiálu pro rostlinu byl oxid uhličitý, tedy plyn, který van Helmont také objevil.¹²⁴ Zavedl do praxe i samotný pojem plyn.

Ve dvacátých letech se dostal do sporu se španělskou inkvizicí, která odmítala jeho vědecké názory a nařkla ho ze spolupráce s protestanty. Byl na tři roky uvržen do domácího vězení a nesměl publikovat. Perzekuce skončila až dva roky před jeho smrtí, úplné rehabilitace se „dočkal“ teprve posmrtně.¹²⁵

¹²² GOVINDJEE-KROGMANN, David, Discoveries in oxygenic photosynthesis (1727–2003): A perspective, Photosynthesis Research, 2004, 1(80), s. 15–57.

¹²³ BLÁŽKOVÁ, Monika, Studium fotosyntézy na středních školách: nové experimenty a protokoly. Diplomová práce. Praha: Přírodovědná fakulta Univerzity Karlovy 2009, s. 15.

¹²⁴ Van Helmont nazýval CO_2 pojmem „gas sylvestre“ a popsal jeho vznik při spalování uhlí. Chemické vlastnosti oxidu uhličitého dále popsal skotský fyzik Joseph Black (1728–1799).

¹²⁵ Wikipedie, Otevřená encyklopedie, heslo Johan Baptista van Helmont, dostupné online na: <https://de.wikipedia.org/wiki/Johan_Baptista_van_Helmont> [10. 5. 2024].

Joseph Priestley (1733–1804)

Narodil se v Leedsu ve východní Anglii v kalvinistické rodině. Jeho otec se živil soukenictvím a matka mu zemřela v dětském věku, proto byl poslán na výchovu ke své tetě, kde se seznámil s presbyteriánstvím a konvertoval k němu. Posléze vystudoval



Joseph Priestley

teologii a stal se kazatelem. Joseph Priestley vynikal nadprůměrnou inteligencí, ovládal například 9 jazyků. Byl výtečným amatérským chemikem. Identifikoval řadu chemických sloučen (oxid dusnatý, amoniak, kyselinu chlorovodíkovou), objevil kyslík a přispěl k objevu dusíku. Vynalezl sodovku nebo mazací gumu. Pro sympatizování s Francouzskou revolucí a náboženské postoje se stal ve své vlasti velmi neoblíbeným. Došlo to tak daleko,

že mu rozzuřený dav vypálil dům, ve kterém mu shořela veškerá jeho vědecká práce. Tento incident ho přiměl k tomu, aby emigroval do Spojených států amerických, kde prožil posledních devět let svého života.

Priestley při svých pokusech prokázal, že rostliny uvolňují na slunci kyslík. Zjistil, že v nádobě s nedostatkem vzduchu svíce není schopná hořet, ale v případě, že dal spolu s hořící svíci do nádoby rostlinu, kterou navíc vystavil slunečnímu světlu, plamen svíce hořel déle. Stejný pokus si vyzkoušel i na myších. V případě, že v nádobě byla rostlina, tak myš žila delší dobu.¹²⁶

Jan Ingenhousz (1730–1799)

Narodil se v Bredě v dnešním Nizozemsku. Rozhodl se pro studium medicíny v Lovani v Belgii. Po ukončení studia si otevřel malou ordinaci. Životní zlom nastal po smrti jeho otce, kdy odjel do Anglie a angažoval se v očkování obyvatel proti pravým neš-



Jan Ingenhousz

tovicím. O této iniciativě se doslechla i císařovna Marie Terezie a pozvala jej do Vídně, aby léčil její rodinu. V Rakousku se mu velice dařilo, oženil se a stal se královským lékařem s doživotním ročním důchodem. Díky finančnímu zajištění mohl studijně cestovat po celé Evropě a seznamoval se s dalšími badateli, mezi něž patřil i Joseph Priestley, jehož práci se nechal inspirovat

¹²⁶ American chemical society, Joseph Priestley, Discoverer of Oxygen: International historic chemical landmark, s. 5, dostupné online na: <<https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/josephpriestleyoxygen.html>> [19. 5. 2024].

a navázal na ni. Závěr života prožil v Anglii, kam utekl před Francouzskou revolucí.¹²⁷

Při svých experimentech přišel na to, že přes den rostliny uvolňují kyslík a přes noc oxid uhličitý. Svou teorii vyvodil z pokusu, kdy do nádoby s vodou ponořil rostlinu a pozoroval ji. Rostlina na světle vypouštěla malé bublinky vzduchu, ale za tmy ne. Prokázal, že tento proces způsobuje sluneční záření a že tuto funkci vykonávají pouze zelené rostliny.¹²⁸

Jean Senebier (1742–1809)

Narodil se do rodiny bohatého obchodníka v Ženevě, kde s přestávkami prožil celý život. Za životní povolání si vybral službu Bohu, byl pastorem a v závěru života se stal hlavním knihovníkem města Ženevy. Kromě duchovní služby se zabýval studiem polygamie, náboženství, výrobou mýdla nebo meteorologií a zabýval se o přírodní vědy.¹²⁹



Jean Senebier



Nicolas-Théodore de Saussure

Při svém výzkumu přišel na to, že oxid uhličitý je spotřebováván rostlinami při výrobě kyslíku a děje se tak v parenchymu, masité části listu. Při svých pokusech ponořil list do speciální nádoby ve tvaru trychtýře. Na užší části nádoby byla umístěna stupnice, na které odečítal množství uvolněného kyslíku. Do vody v nádobce poté přidával různé chemické látky a pozoroval, co se bude dít. V případě, kdy do vody přidal uhličitany, vyzoroval, že díky nim list uvolňuje mnohem více kyslíku. Z průběhu experimentu vydedukoval, že uhlík rostlina absorbuje a kyslík uvolňuje. Svůj objev shrnul ve větě: „Oxid uhličitý považuji za potravu pro rostliny.“¹³⁰

Nicolas-Théodore de Saussure (1767–1845)

Narodil se v Ženevě do rodiny věhlasných vědců. Jeho otec, slavný geolog, meteorolog a horský průzkumník, vzdělával své děti doma, protože považoval veřejné školství za nedostatečné. Vysokoškolské studium absolvoval Nicolas ve svém rodném městě a bylo zaměřené na studium přírodních věd. Po jeho ukončení se stal asistentem svého otce. Podnikli spolu spoustu studijních cest, při nichž studovali fyzikální konstanty. Zbytek svého života prožil v Ženevě, kde zastával veřejné funkce a věnoval se vědeckému výzkumu tematicky spjatému hlavně s chemií a botanikou. Díky tomuto výzkumu zjistil mnoho cenných poznatků o výživě a fyziologii rostlin.¹³¹

Za hlavní vědecký přínos ve výzkumu fotosyntézy považujeme jeho zjištění, že fotosyntéza ke svému průběhu potřebuje vodu. Jeho výzkumné metody se nelišily od metod jeho předchůdců, ale velký rozdíl spočíval v tom, že velmi pečlivě při svých pokusech zaznamenával hmotnostní přírůstek rostlin a složení vzduchu, ve kterém se rostliny nacházely. Své pokusy často opakoval, aby zkontroloval jejich správnost.¹³²

127 Wikipedie, Otevřená encyklopedie, heslo Jan Ingenhousz dostupné online na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Jan_Ingenhousz> [10. 5. 2024].

128 BAILEY, Regina, Jan Ingenhousz: scientist who discovered photosynthesis, ThoughtCo., dostupné online na:

<<https://www.thoughtco.com/jan-ingenhousz-4571034>> [28. 7. 2024].

129 BOOKRAGS, Gale, World of biology on Jean Senebier, dostupné online na: <<https://www.bookrags.com/biography/jean-senebier-wob/#gsc.tab=0>>

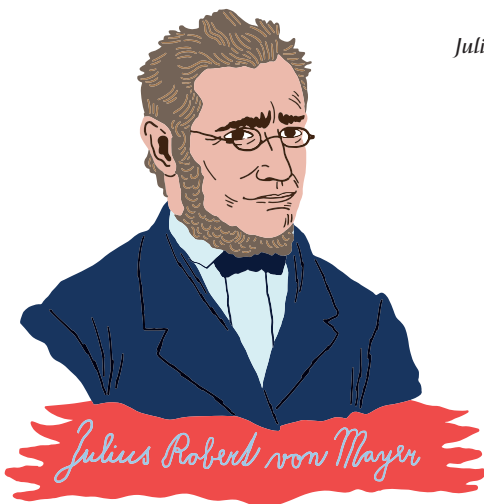
[15. 7. 2024]; Wikipédia, l'encyclopédie libre, heslo Jean Senebier, dostupné online na: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean_Senebier> [28. 7. 2024].

130 FAR FARMER, Edward, Jean Senebier's thoughts on experimentation and their relevance for today's researcher, Archives des Sciences, 2010, 63, s. 186–88.

131 HILL, Jane, F., Chemical Research on plant growth, a translation of Théodore de Saussure's Recherches chimiques sur la Végétation, New York: 2013, s. 32–39.

132 Universitet i Oslo, Institut for biovitenskap, Historien om plante fysiologi, dostupné online na: <<https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/h/historien-om-plantefysiologi.html>> [20. 7. 2024]; Wikipedia, die freie Enzyklopädie, heslo Nicolas Théodore de Saussure, dostupné online na:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Nicolas_Th%C3%A9odore_de_Saussure> [28. 6. 2024].



Julius Robert von Mayer

Julius Robert von Mayer (1814–1878)

Život Julia Roberta von Mayera byl velmi pohnutý. Narodil se v německém Heilbronně jako nejmladší ze tří bratrů do rodiny lékárníka. Vystudoval medicínu v Tübingenu, kde byl na rok suspendován ze školy, protože se stal členem nepovoleného studentského spolku. Po dokončení studia se stal ločním lékařem na lodi, která plula do Batávie v Indonésii. Při této cestě se začal intenzivně zajímat o fyzikální jevy. Po návratu do svého rodného města se stal vrchním chirurgem a věnoval se bádání v oblasti přírodních věd. Výsledky svého studia zveřejnil v eseji, která nebyla vědeckou komunitou přijatá, protože používal neodborné termíny.

V roce 1850 se badatel pokusil spáchat sebevraždu skokem z okna. Na vině bylo více faktorů. Zemřely mu tři děti, výsledky jeho vědecké činnosti byly znevažovány, a navíc měl potíže se zákonem, protože se angažoval v revolučním roce 1848. Svůj pokus o sebevraždu přežil, ale byl hospitalizován na tři toky do psychiatrické léčebny. Kvůli uvedeným potížím byl považován za městského podivína, což mu poškodilo pověst lékaře. Po tomto těžkém životním období se situace obrátila. Byly mu přiznány vědecké zásluhy, a dokonce získal rytířský titul. Po smrti byl prohlášen za nejvýznamnějšího občana, který se narodil v Heilbronně.¹³³

Julius Robert von Mayer byl jedním ze zakladatelů termodynamiky a formuloval její první zákon. V rámci výzkumu fotosyntézy přišel na to, že rostliny mění světlo na chemickou energii, a tím přidal poslední neznámou do rovnice fotosyntézy.¹³⁴

5.2 Fotosyntéza základ zemědělství

Fotosyntéza zajišťuje výživu a fungování rostlinné říše, jejímž prostřednictvím rovněž slouží jako fundamentální proces pro zemědělskou výrobu. Zemědělská produkce základních surovin je přímo závislá na fotosyntéze, čímž logicky zasahuje do všech stěžejních oblastí: od potravinářství a krmivářství přes textilní a stavební průmysl až po výrobu paliv a olejů. Fotosyntéza je tedy klíčový prvek zemědělství, a to jak pro samotnou produkci rostlinné hmoty a globální potravinovou bezpečnost, tak pro udržitelnost a civilizační rozvoj.

„Zemědělská výroba je ve své podstatě záměrné (řízené) využívání biologických sil zárodků rostlin a zvířat, které dovedou samovolně množit svoji hmotu (výroba pomocí spontánní činnosti organismů). Každý jedinec se snaží rozmnožovat se, zachovat svůj druh, množit svoji hmotu; toho využívá pěstitel – výrobce – a sklízí.“ Těmito slovy zahajuje prof. František Duchoň výklad svazku Výživa a hnojení kulturních rostlin zemědělských (svazek Velké encyklopedie zemědělské), který vydala Československá akademie zemědělská v Praze roku 1948.¹³⁵ Duchoňova definice charakterizuje přesně a věcně podstatu zemědělské výroby: využití samovolného množování hmoty. U rostlin je to fotosyntéza, která jim umožňuje, aby rozmnožovaly svou hmotu a snažily se zachovat svůj druh (a zprostředkovaně i živočichy na nich závislé). Lze proto bez nadsázky prohlásit, že základem zemědělství je fotosyntéza.¹³⁶

Z výše uvedeného vyplývá, že zemědělská produkce, potažmo péče o rostliny za účelem maximalizace zisku jejich organické hmoty, se ve své podstatě soustředí na intenzifikaci procesu fotosyntézy u pěstovaných rostlin podporou jednotlivých faktorů, které fotosyntézu ovlivňují. To se prakticky odráží ve všech polních pracích vyjma sklizně, od půdní kultivace přes hnojení rostlin a eliminaci plevelů až po závlahy se všechny polní práce,

¹³³ Heilbronn Stadtarchiv, Robert Mayer, dostupné online na: <<https://stadtarchiv.heilbronn.de/stadtgeschichte/geschichte-a-z/m/mayer-robert.html>> [7. 6. 2024].

¹³⁴ Wikipedie, Otevřená encyklopedie, heslo Robert Mayer, dostupné online na: <https://de.wikipedia.org/wiki/Robert_Mayer> [10. 5. 2024].

¹³⁵ DUCHOŇ, František, Výživa a hnojení kulturních rostlin zemědělských, Praha 1948, s. 5.



Hlubkové kypření nahrazuje orbu. Hlubkové kypření se používá především před setím hluboko kořenících rostlin. Zajišťují správný vývoj kořenového systému, nezbytného pro efektivní čerpání vody a živin a produkci rostlinné hmoty (zdroj: archiv kurátora)

agronomické i agrotechnické výzvy ve svém důsledku dotýkají přímo fotosyntézy a jejích dílčích potřeb. Nebude nadsázkou, když prohlásíme, že podstatou zemědělství je podpora fotosyntézy.

Překvapivá souvislost fotosyntézy s tradičním hlediskem úrodnosti půd, která se vizuálně rozlišuje podle barvy, je nasnadě. Každá rostlina potřebuje jinou sumu tepla (uvádí se jako součet stupňů za dny vegetace). Teplo zlepšuje příjem živin tím, že urychluje transpiraci,¹³⁷ a tedy množství nasávané vody a množství potenciálních živin získaných z vodného roztoku.¹³⁸ Barva půdy pak určuje, kolik tepla je schopna vstřebat, a to dle

prosté poučky: čím tmavší barva půdy, tím vyšší potenciál příjmu tepla a světelné energie (nejlepší příjem tedy logicky vykazují černozemě). Teplotní optimum pro fotosyntézu v našem podnebí je 20–30 °C.¹³⁹

Zemědělství díky využití schopnosti rostlin „množit svou hmotu“ ukládá sluneční energii prostřednictvím fotosyntézy, de facto kalorií, které se stávají základem fungování civilizací. Rostlinnou hmotu vzniklou na základě syntetických procesů, kdy se ze základních stavebních látek vytvářejí látky složitější, zpracují jako potravu živočichové (získají z nich mj. energii). Ti vrací část

136 RUMIL, Milan, Využití organické hmoty k energetickým účelům, Zemědělská ekonomika XXXIII, 1987, 6, s. 464.

137 DUCHOŇ, F., Výživa a hnojení kulturních rostlin, c. d., s. 15.

138 Vědci z Brjanské státní zemědělské akademie pod vedením akademičky prof. Pakšinové zkoumali závislost výnosů obilnin na transpiraci, a to při různých kombinacích růstového prostředí, resp. dalších faktorů ovlivňujících život rostlin a proces fotosyntézy. Bylo zjištěno, že spolu s dostatkem živin a minerálů a s dostatkem půdní vláhy a slunečního záření (vztah slunečního záření a transpirace se ukazuje jako lineární) patří intenzita transpirace mezi nejdůležitější faktory ovlivňující výnos, tedy produkci biologické hmoty a efektivitu zemědělské výroby obecně, přičemž jednotlivé faktory, nazvěme je „fotosyntetické“, jsou natolik provázané jeden s druhým, že je prakticky nelze funkčně oddělovat, viz PAKŠINA, Světlana, M. – MALYAVKO, Vladimir – PETROVNA, Galina et al., Vlastnosti funkční závislosti výnosu zrna na transpiraci, in: Bulletin Federální státní vzdělávací instituce vyššího odborného vzdělávání Brjanská státní zemědělská akademie, 2015, 5, s. 24–30 (rusky).

139 PAVLŮ, Lenka, Základy pedologie a ochrany půdy, Praha 2018, s. 42.

látek vyloučených vypařováním a vylučováním (voda, oxid uhličitý, čpavek) zpět jako potravu pro rostliny. Další látky se vrací do oběhu činností rozkladačů (destruentů), kteří rozkládají živočišnou a rostlinou biomasu na základní živiny, které slouží následně znovu jako potravu pro rostliny. Vzniká dokonalý cyklus produkce a redukce, koloběh živin, jímž kolotá v neustálé změně neuvěřitelné množství energie vázané zejména v uhlíku.

Není vůbec nadsázkou hovořit o fotosyntéze jako o zeleném zázraku, neboť pro získání 1 kg sušiny musí rostlina „vdechnout“ a zpracovat 898 litrů oxidu uhličitého. To v praxi znamená, že např. dle údajů z 8. žnového zpravodajství ze sklizně 2023 o výnosech pšenice ozimé 6,6 t/ha „vdechl“ hektar (tj. čtverec 100×100 m) pšenice 5 926 800 litrů oxidu uhličitého. To při koncentraci 0,04 % oxidu uhličitého v atmosféře znamená téměř 15 miliard litrů vzduchu vdechnutého pšenicí.¹⁴⁰

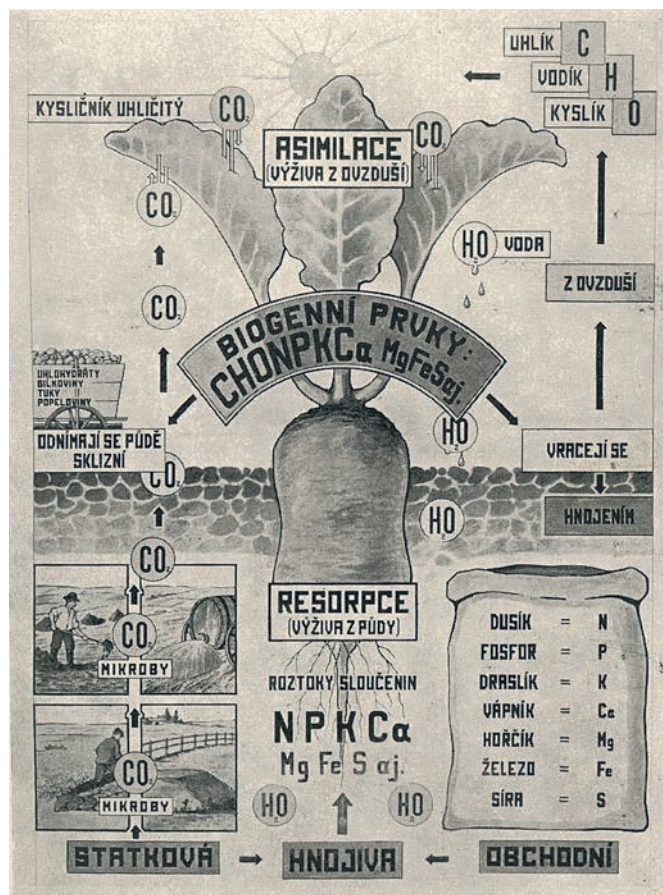
Fotosyntéza funguje jako základní mechanismus, díky němuž rostliny získávají živiny, které jsou nezbytné pro jejich vývoj a růst. Z hlediska zemědělské produkce tento proces podmiňuje to, aby se rostliny dostaly do produkčního stadia a poskytly pěstiteli úrodu, a to ve všech formách rostlinné hmoty a prostřednictvím různých částí kulturních plodin. Fotosyntéza přímo ovlivňuje výnosy, a to především tím, že vymezuje stupeň asimilace uhlíku a produkce rostlinné hmoty. Vyšší fotosyntetická efektivita vede přirozeně k nárůstu zemědělské produkce a vyšším výnosům, které jsou pro zemědělství zásadní. Zároveň výrazně přispívá k efektivitě oběhu živin tím, že usnadňuje příjem a využití základních prvků jako dusíku (N), fosforu (P), draslíku (K). Díky redukci oxidu uhličitého a produkci kyslíku fotosyntéza snižuje množství atmosférického oxidu uhličitého a podporuje environmentální udržitelnost lidské činnosti.

Fotosyntéze vděčíme za to, že máme co jíst, do čeho se oblékat a čím se hřát, neboť lidská potrava a většina průmyslových surovin pochází přímo či nepřímo, ale téměř bezvýhradně z fotosyntetizujících organismů. Základní plodiny – klíčové pro vývoj lidstva dnes stejně jako v historii – pšenice, rýže, kukuřice by bez fotosyntézy nemohly existovat. V neposlední řadě produkce biomasy fotosyntetizujících rostlin slouží jako obnovitelný zdroj pro výrobu biopaliv. Plodiny jako cukrová třtina, kukuřice nebo proso jsou šlechtěny na maximalizaci biomasy, a to jako alternativa k fosilním palivům a jako prostředek redukce emisí skleníkových plynů generovaných jejich spalováním.

Fotosyntéza je základem zemědělství par excellence. Poro-
zuměním fotosyntetickému procesu a jeho podporou jsme se

dostali na současnou úroveň zemědělské produkce. Prohloubením poznatků o fotosyntéze můžeme pokořit nové hranice pokroku a inovovat zemědělskou technologii s ohledem na měnící se pěstební podmínky tak, abychom maximalizovali efektivitu a minimalizovali práci.

Podstatou zemědělství je výroba biologické hmoty. Hovoříme-li o rostlinné produkci, pak se zemědělství musí starat o podporu fotosyntézy. Jelikož fotosyntetický proces znamená redukci oxidu uhličitého a produkci kyslíku, dojdeme jednoduchou úvahou k tomu, že citlivě zvolené zemědělství s ohledem na krajinu a potřeby tvoří výrazný prevenční faktor klimatických změn.



Schematické znázornění teorie a praxe výživy rostlin

(zdroj: DUCHOŇ, František, *Výživa a hnojení kulturních rostlin zemědělských*, Praha 1948, s. 7)

5.2.1 Vznik zemědělství a domestikace plodin

Zemědělství se začalo rozvíjet přibližně před 12 000 lety po konci poslední doby ledové a vyvolalo zásadní změnu v dosavadním způsobu života lidí. Lovci a sběrači postupně začali žít usedlejší životem, začali chovat zvířata a pěstovat plodiny. Naučili se selektovat divoké rostliny, aby splňovaly jejich potřeby, jako byla chuť, úrodnost, adaptace na různé klimatické podmínky nebo odolnost proti škůdcům a chorobám. Stalo se tak v širokém prostoru Eurafrasiie, který zahrnoval hned několik domestikčních center najednou – blízko východní Úrodný půlměsíc v povodí řek Eufrat a Tigris (před 11 000 lety), pánve Žluté řeky a řeky Jang-c'ťiang v Číně (před 9 000 lety), vysočinu Papuy Nové Guiney (před 9 000 lety) a subsaharskou Afriku (před 5 000–4 000 lety). Další primární centra vzniku zemědělství se nacházela na severu Jižní Ameriky (před 5 000–4 000 lety), ve středním Mexiku (před 5 000–4 000 lety) a na východě Severní Ameriky (před 4 000–3 000 lety).¹⁴¹

Vynález zemědělství lidem umožnil získat dostatek potravy a vytvářet zásoby. Lidé tak mohli trávit méně času sháněním potravy a více se věnovat jiným činnostem, jako byla například výroba nástrojů, ale také písemnictví a umění. Zemědělství umožnilo raketový růst celosvětové populace – z přibližně pěti milionů lidí před 10 000 lety na dnešních osm miliard.¹⁴²

V historii zemědělství můžeme rozlišit několik klíčových událostí: neolitickou revoluci, tzv. kolumbovskou výměnu, industriální revoluci, zelenou revoluci a současnou genovou revoluci.¹⁴³

Jako neolitická revoluce bývá označováno období cca 10 000 až 4 500 let př. n. l.,¹⁴⁴ kdy došlo ke vzniku a prvotnímu masivnímu období rozvoje zemědělství. V této době byla domestikována většina nejdůležitějších plodin, jako je pšenice (9 000–8 500 let př. n. l.), ječmen (8 500 let př. n. l.), rýže či brambory (8 000 let př. n. l.).

Klíčovou událostí v historii zemědělství byla tzv. kolumbovská výměna, která začala po roce 1492 a trvala celé 16. století a přinesla významný rozvoj gastronomie a také ekonomiky. Tento proces zahrnoval přenos plodin mezi Novým světem (Amerikou) a Starým světem (Evropou, Asií a Afrikou) na konci 15. století a v následujícím období. Nový svět získal plodiny jako pšenice, rýže, cukrová třtina, naopak Starý svět byl seznámen s plodinami jako kukuřice, brambory, rajčata a tabák. Toto období mělo významný vliv na formování světa, jak jej známe dnes.¹⁴⁵

V druhé polovině 18. století začala v Anglii industriální revoluce. V tomto období byly zavedeny první stroje a technologie, které umožnily masovou výrobu a zefektivnění zemědělských procesů, což vedlo k dalšímu rozvoji zemědělství.

Zelená revoluce představuje období od 50. do 70. let 20. století, kdy došlo k významnému nárůstu produkce potravin v mnoha částech světa. Hlavním zaměřením bylo zlepšení kvality a výnosu plodin prostřednictvím vědeckého výzkumu a aplikací nových technologií (šlechtění, využívání chemikálií, zavlažování). Cílem bylo pokrytí narůstající poptávky potravin v důsledku rostoucí světové populace a také boj s hladomorem v některých částech světa.¹⁴⁶

Genová revoluce (od 80. let 20. století) se na rozdíl od zelené revoluce, která byla zaměřena na tradiční metody šlechtění a intenzivní využívání chemikálií a zavlažování, soustředí na molekulární a genetické přístupy ke zlepšení vlastností plodin. Cílem je dosáhnout vyšších výnosů, odolnosti vůči chorobám a škůdcům, přizpůsobení extrémním klimatickým podmínkám, zlepšení nutričních hodnot a snížení závislosti na chemických hnojivech a pesticidech.¹⁴⁷ Genová revoluce v současné éře zemědělské vědy a techniky vychází z pokroků v genetickém inženýrství, jako je například sekvenování DNA a genová editace.

Významným tématem se v posledních desetiletích staly v oblasti udržitelného zemědělství a produkce potravin řasy. Jak mořské, tak sladkovodní druhy řas představují velký potenciál pro inovace v potravinářském průmyslu, bioenergetice, farmacii

140 Další zajímavá čísla poskytuje kvalifikační práce NEUWIRTHOVÁ, Jitka, Transport oxidu uhličitého listem hypostomatických rostlin, České Budějovice 2015.

141 DIAMOND, Jared – BELLWOOD, Peter, Farmers and Their Languages: The First Expansions, *Science*, 2003, 300(5619), s. 597–603.

142 PRÁŠILOVÁ, Marie – HOŠKOVÁ, Pavla, The world population and its expected future evolution, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2010, LVIII, No. 3, s. 197–206.

143 DIAMOND, Jared, Kolaps, Praha: Academia, 2005; SMÝKAL, Petr – NELSON, Matthew – BERGER, Jens et al., The impact of genetic changes during crop domestication, *Agronomy*, 2018, 8(7), 119.

144 Wikipedia, free encyclopedia, heslo Neolithic, dostupné online na: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic>> [10. 5. 2024].

145 JORDAN, I., King, The Columbian Exchange as a source of adaptive introgression in human populations, *Biology Direct*, 2016, 11, s. 1–8.

a biotechnologiích. Jsou ceněny pro svůj vysoký obsah bílkovin, vitamínů a minerálů. Spirulina a Chlorella jsou již dnes běžnou součástí zdravé výživy a doplňků stravy. Řasy jsou také zkoumány jako zdroj biopaliv třetí generace, stávají se zdrojem materiálů pro výrobu bioplastů a dalších biotechnologických aplikací.¹⁴⁸

Zpracování půdy řádkovým kypřičem (technologie pásového zpracování půdy). Tato technologie provzdušňuje půdu, umožňuje její rychlejší prohřátí a zlepšuje vsakování vody. Výsledkem je snížení rizika vodní a větrné eroze (zdroj: archiv kurátora)

5.2.2 Zemědělství a klimatické změny

Změna klimatu obecně je se zemědělstvím složitě propojena v komplexní vztahové síti příčin a následků, a to jak pozitivně, tak negativně. V tomto příspěvku se omezíme na výčet nejdůle-



146 Britannica, heslo Green revolution, dostupné online na: <Green revolution | Definition, Advantages, Importance, & Facts | Britannica> [21. 6. 2024].

147 HOBZA, Roman – HUDZIECZEK, Vojtěch, Cílené genové editace zemědělských plodin, Živa, 2022, 70(4), s. 154–155.



Mělké podmítání půdy. Mělké podmítání mechanicky odstraní klíčící plevely a šetrně připraví půdu pro další setí. Snižuje negativní vlivy intenzivního zemědělství na půdní fond (zdroj: archiv kurátora)

žitějších procesů, které ze vztahu fotosyntézy, zemědělství a klimatu (resp. ekologie) vyplývají.¹⁴⁹

Změnou klimatu rozumíme především dlouhodobé změny v průměrných podmínkách počasí, které mohou zahrnovat změny teploty, srážek, větrů a dalších klimatických charakteristik. Všechny tyto faktory zásadně ovlivňují růst rostlin, jejich zdraví a produkční kvalitu i kvantitu.¹⁵⁰ Se změnou klimatu se stále častěji objevují extrémní jevy, jako jsou teplotní vlny vedoucí k suchům, extrémní srážky způsobující záplavy a větrné či prachové bouře. Jejich následky se projevují v podobě snížených výnosů, v některých případech neúrodou či zničením veškeré úrody.¹⁵¹

Změny teplot a množství srážek, které se v mnohých oblastech stávají novou normou, vyvolávají nutnost, aby zemědělský průmysl reagoval přizpůsobením pěstebních technologií a technologických výrobních postupů.¹⁵² Důvodem k adaptaci zemědělské výroby jsou především posuny ve vegetačním období, proměnné množství teplých dní a nevhodnost stávajících odrůd, které nejsou schopny adaptovat se v krátké době na změny tak, aby zajistily potřebné množství produkce. Zemědělci musejí i lokálně upravovat osevní plány a pěstební postupy.

Množství srážek dalekosáhle ovlivňuje pěstební možnosti v dané oblasti. Voda je společně s oxidem uhličitým stěžejní látkou pro fotosyntézu, bez dostatku vody probíhá transpirace

méně intenzivně, rostlina je více namáhána, neboť musí získávat vodu z větších hloubek, a výsledkem je negativní dopad na fotosyntézu. To vše vede ke stejnému důsledku: rostliny se pomalu a špatně vyvíjejí, produkce rostlinné hmoty je malá a výnosy nízké. Nedostatek vody se proto řeší instalováním přenosných zavlažovacích systémů nebo stavbou stacionárních závlahových systémů.¹⁵³ Voda pro závlahy se ovšem musí získávat poblíž místa, kde se nacházejí zavlažovaná pole. Obvykle se za tímto účelem využívají podzemní zdroje a hloubkové vrty, což vede k vyčerpávání podzemních zásob a ještě silnějšímu nedostatku vody v oblasti. Voda se následkem takových stavů může stát extrémně vzácnou strategickou surovinou, obzvláště v konfliktních oblastech, jako například na území Pásma Gazy a přilehlého izraelského území, kde probíhá dlouhotrvající boj o vodní zdroje.¹⁵⁴

Se zvyšující se teplotou a menším množstvím srážek, a naopak se snižující se teplotou a větším množstvím srážek se mění i dynamika vývoje počtu škůdců a chorob. Klimatické změny vytvářejí nové životní niky pro nové nebo invazní druhy rostlin a nové druhy škůdců. Každý škůdce může při přemnožení zdecimovat úrodu a výrazně narušit výrobní a potravinové řetězce. Šíření chorob bakteriálního, virového či plísňového původu vytváří potřebu zintenzivnit používání pesticidů a podpůrných látek, dodávaných rostlinám za účelem zvýšení jejich rezistence

a zlepšení zdraví. Naproti tomu nadměrné používání pesticidů a dalších chemických látek nepatří mezi dobře udržitelné zemědělské činnosti a může vést k vedlejším problémům, obzvláště při dlouhodobějším používání.¹⁵⁵

Dosavadní zemědělské postupy a změny ve využívání půdy, vrcholící ve 20. století, významně přispěly k emisím skleníkových plynů, a to především odlesňováním, rozoráváním remízů a polních cest, zaoráváním lučních kultur a nadměrným používáním syntetických hnojiv. Moderní zemědělské postupy¹⁵⁶ jsou založené na nápravě chybných kroků minulosti a preventivních opatřeních. Mnohé zemědělské postupy jsou nezřídka znovuobjevované tradiční (zejména bezorebný systém obdělávání půdy) a zemědělsko-krajinářské přístupy, jako je pěstování krycích plodin, vysévání meziplodin nebo agrolesnictví. Tyto postupy mají potenciál zachytávání uhlíku, resp. oxidu uhličitého,

prostřednictvím fotosyntézy zvyšovat.¹⁵⁷ Moderní zemědělské postupy si kladou za cíl kvalitativně obnovit krajinu a půdní fond. Fixace uhlíku touto formou je zřejmě tím nejlepším a nejefektivnějším procesem, na němž se může podílet prakticky každý, kdo pečuje o půdu. Nekonečná uhlíková smyčka by měla být hnacím motorem všech snah zemědělského průmyslu, neboť nic nemůže vytvořit dokonalejší harmonii potřeby a užitku než vysoké výnosy v kombinaci s fixací oxidu uhličitého.

Souhrnně lze říci, že zemědělství a změna klimatu jsou vzájemně hluboce propojeny, přičemž každá z obou složek ovlivňuje a je ovlivňována druhou ve složité vzájemné vazbě. Pochopení těchto vztahů je zásadní pro vypracování účinných strategií¹⁵⁸ a zavádění nových technologií,¹⁵⁹ které zmírní dopady změn klimatu na zemědělství a zároveň zajistí potravinovou bezpečnost a udržitelnost životního prostředí.

148 Akademie věd České republiky, Fascinující mikrořasy: pradávne organismy prospěšné nejen pro lidské zdraví, dostupné online na:

<https://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/biologie-a-lekarske-vedy/Fascinujici-mikrorasy-Pradavne-organismy-prosperne-nejen-pro-lidske-zdravi/> [10. 5. 2024].

149 Velmi podrobný vzhled do problematiky klimatických změn a jejich dopadů (mj.) na zemědělství na území České republiky poskytuje Ministerstvo životního prostředí v komplexní studii dopadů, zranitelnosti a zdrojů rizik souvisejících se změnou klimatu v ČR, Český hydrometeorologický ústav, 2019, dostupné online na: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/studie_dopadu_zmena_klimatu/\\$FILE/OEOK-Aktualizovana_studie_2019-20200128.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/studie_dopadu_zmena_klimatu/$FILE/OEOK-Aktualizovana_studie_2019-20200128.pdf) [15. 4. 2024] (tj. včetně základní studie z roku 2015 a její aktualizované verze z roku 2019, na niž odkazujeme především). Rozsáhlý studijní materiál, týkající se klimatických rizik ve Spojených státech, nabízí vládní dokument U. S. Global change research program, Fourth National Climate Assessment. Volume II: Impacts, Risks, and Adaptations in the United States, Washington DC: U. S. Government Publishing Office 2018, dostupné online na: <https://www.globalchange.gov/our-work/fourth-national-climate-assessment> [18. 5. 2024].

150 BRÁZDIL, Rudolf – TRNKA, Miroslav et al., Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost, Brno 2015, s. 231–234.

151 Účinná opatření zohledňující krajinné specifikace vypracoval např. rakouský agronom a spisovatel Sepp Holzer, jehož knihy jsou čtenářsky velmi dobře přístupné, viz HOLZER, Sepp, *Agrar-Rebellion Jetzt*, Graz: 2023; česky zejm.: HOLZER, Sepp, *Poušť, nebo ráj*, Brno 2014.

152 V České republice můžeme vývoj teplot a srážek sledovat na webu INTERSUCHO, dostupné online na: <https://www.intersucho.cz/?from=2024-07-08&to=2024-08-05¤t=2024-08-04> [7. 6. 2024]. Na uvedeném webu lze snadno získat přehled i o vývoji na Slovensku a ve střední Evropě a získat informace o aktuálních podnebných podmínkách ve světě (odkazem na relevantní služby a zdroje).

153 K predikci různých variant dopadů sucha na území ČR podává podrobné informace kap. 7. Scénáře budoucího sucha pro Českou republiku a jeho očekávané dopady, viz BRÁZDIL, R. – TRNKA, M. et al., *Sucho v českých zemích*, c. d., s. 288–343.

154 Podle studie OSN a Německého federálního institutu geologických věd a přírodních zdrojů je vodní hospodářství zásadním problémem v mnohých oblastech světa, příkladem v oblasti Pásmo Gazy, kde velmi husté osídlení, nelegální nakládání s vodou a nemalou měrou též odčerpávání vody z hraničních oblastí Izraelem vede k tomu, že akvifer, přirozený podzemní kolektor pitné vody, již nedokáže zásobovat oblast vodou. Boj o přírodní zdroje, v tomto případě vodu, tak tvoří nedílnou součást válečného konfliktu dvou znesvářených stran a do značné míry může být částečně jeho nevysloveným původcem, viz ESCWA Water Resources Section: Coastal Aquifer Basin, s. 498–499, dostupné online na: waterinventory.org/groundwater/coastal-aquifer-basin [28. 6. 2024].

155 HU, Ruifa – HUANG, Xusheng – HUANG, Jikun et al., Long-and short-term health effects of pesticide exposure: a cohort study from China, 2015, *PLoS One*, 10(6), e0128766.

156 Alespoň částečně bychom měli hovořit spíše o dobře zapomenutých starých zemědělských postupech, neboť mnohé postupy, obhájené dnes vědecky, využívali lidé v minulosti a ve velmi primitivních formách zemědělství. V mnohém se tak nejedná o nové postupy, ale o návrat k postupům tradičním. – Srov. např. studii VO-RONIN, Boris, A. – ČUPINA, Irina, P. – VORONINA, Jana, V., *Особенности органического сельского хозяйства*, АОН, 2019, 2.

157 Správně naplánované zemědělské postupy vedou k výrazným výsledkům, viz ASFAW, Solomon – LIPPER, Leslie, *Managing climate risk using climate-smart agriculture. Managing climate risk through climate-smart agriculture*, s. 4–5, in: *Food and agriculture organization of the United nations*, Rome: United nations, 2016.

158 O strategiích a postupech blíže např. STEENWERT, Kerri, L. – HODSON, Amanda, K. – BLOOM, Arnold, J. et al., *Climate-smart agriculture global research agenda: scientific basis for action, Agriculture and Food Security*, 2014, 3, s. 1–39.

159 Možnosti využití vzdálené správy a internetu věcí rozpracovává příspěvek kolektivu MENŠÍK, Ladislav – VIK, Robert – PRETL, Silvan et al., *Možnosti uplatnění internetu věcí (IoT) v precizním zemědělství v ČR*, *Úroda*, 2019, XLIV(12), s. 341–350.

5.2.3 Moderní pěstební metody – smart agriculture

Zvyšování produktivity zemědělských plodin je založeno na podpoře metabolismu rostliny, a to úzce souvisí s fotosyntetickým procesem. Možností zvyšování intenzity fotosyntézy je v praxi řada, nicméně hlavním nástrojem je optimalizace výživy v průběhu pěstování. To umožňují moderní systémy, jako je precizní zemědělství v otevřené krajině (polní produkce) anebo hydroponie, a související metody pro tzv. krytou produkci ve sklenících nebo indoor stavbách.

Precizní zemědělství zahrnuje využití GPS a geografických informačních systémů (GIS), které se používají k mapování pěstebních pozemků a monitorování stavu pěstovaných kultur. To snižuje náročnost na péči o rostliny, zmenšuje nákladovost a současně omezuje zátěž půdy a životního prostředí. Například technologie proměnlivých dávek (VRT) umožňuje farmářům aplikovat vstupy (osiva, hnojiva, pesticidy) v různých dávkách napříč pozemky, čímž se optimalizuje využití zdrojů a zvyšuje výnos. Pro letecké monitorování porostů se používají drony vybavené kamerami a senzory. Pořizují snímky porostů ve velkém rozlišení. Již relativně nepodstatné snížení intenzity fotosyntézy lze totiž sledovat hyperspektrálními senzory umístěnými na dronech. To pomáhá při včasné detekci nemocí, škůdců a nedostatku živin.

Další pojem související s intenzifikací fotosyntézy je „internet věcí“ (IoT), který se již stabilně využívá v sadech nebo sklenících. Chytré senzory jsou nasazeny pro monitorování vlhkosti půdy, teploty a vlhkosti vzduchu a poskytují reálná data, která pomáhají při rozhodování o dalším postupu nebo přímo ovlivňují další zařízení a jejich chod. Typickým příkladem jsou automatizované zavlažovací systémy, běžné v kryté produkci – především v hydroponii. Plodina takto dostane potřebné množství vody a živin ve správný čas.

Automatizace a monitoring porostů jsou základem chytrého zemědělství. Systémy automaticky regulují zavlažování, osvětlení a výživu podle potřeb rostlin. Monitorovací systémy sledují stav rostlin a prostředí, aby umožnily rychlou reakci na změny a optimalizaci podmínek pro růst. Především fotosyntéza a její rychlost závisí i na drobné změně vnějšího prostředí, proto okamžitá informace o takové změně může vést například ke spuštění závlahy, cílenému přihnojení rostlin anebo například sepnutí umělého osvětlení ve sklenících.

Robotika a automatizace v zemědělství také rychle postupují. Autonomní traktory a stroje jsou schopné pracovat samostatně bez potřeby lidského operátora. Zejména v intenzivní zahradnické produkci mají své místo. Kupříkladu se vyvíjejí roboti pro sklizeň, což zvyšuje efektivitu a snižuje náklady na pracovní sílu. Zdánlivě s tématem fotosyntézy nemá robotika přímé propojení, ale opak je pravdou – robotické systémy a jejich smysluplné využití jsou vázané na umělou inteligenci, která shromážděním obrovského množství dat může mnohem přesněji a rychleji než člověk upozornit na blížící se riziko nebo rovnou ovládat výkonné prvky, jež zabezpečí potřeby rostlin.

Z metod pěstování budoucnosti (ale již aktuálně využívaných ve futuristických projektech) můžeme zmínit například „vertical farming“. Vertikální zahradnictví přináší inovativní a udržitelný přístup k produkci potravin, který může být klíčem k řešení problémů souvisejících s urbanizací, změnami klimatu a omezenými zdroji.

Využívá vertikálního prostoru kultivace rostlin ve vrstvách/etážích nebo sloupcích namísto tradičního horizontálního rozložení na polích nebo zahradách. Tento přístup je často využíván ve městech a hustě osídlených oblastech, kde je nedostatek plochy pro tradiční zemědělství.

Vertikální struktury jsou zelené plochy, na nichž jsou rostliny umístěny na speciálně navržených stěnách, které umožňují pěstování v regálech a policích. Můžeme se s nimi setkávat na veřejně přístupných místech obchodů či bank, kde se používají jako dekorativní prvky. Umístění stěn je běžné v budovách a místech bez přirozeného osvětlení, proto se používá umělého osvětlování rostlin. Speciální osvětlení tvoří LED světla, která poskytují optimální spektrum záření pro růst rostlin, což umožňuje pěstování rostlin s vysokou efektivitou a výnosem. Současně lze upravovat kvalitativní i kvantitativní parametry pěstovaných rostlin. Příklad dekorativní vertikální zelené stěny určené pro vnitřní prostory si může návštěvník prohlédnout v expozici Fotosyntéza.

Vertikální produkce sice nemusí výrazně zvyšovat intenzitu fotosyntézy sama o sobě, ale skrývá jiný výrazný benefit – na jednotce pěstební plochy se násobně zvyšuje množství vytvořené biomasy, a to má obrovský dopad na výnosy, ale třeba i ovlivnění mikroklimatu ve městech.

Jako stěnové systémy jsou vertikální zahrady často instalovány na zdech budov. Radíme sem ale také etážové systémy umístěné v indoor zařízeních, kdy jde například o budovy bez přístupu světla a vše je zajištěno uměle. Rostliny jsou uspořádány na regá-

lech – policích, které umožňují víceúrovňové pěstování. Regály mohou být pevné nebo mobilní, což umožňuje snadnější manipulaci s rostlinami.

Vertikální zemědělství skýtá celou řadu výhod. Patří mezi ně výrazná úspora místa, neboť umožňuje až 10násobné zvýšení hustoty porostů na jednotku plochy. Díky systémům hydroponie a aeroponie je spotřeba vody a živin nižší než u tradičního zemědělství, dochází k recirkulaci a opětovnému využití dodané vody a živin. Snižuje též obsah reziduí v plodinách: v uzavřených prostorech je menší spotřeba pesticidů a herbicidů, což může vést k zdravějším produktům. Umělé osvětlení a kontrolované prostředí umožňuje pěstovat rostliny po celý rok, bez ohledu na vnější klimatické podmínky.

Uvedené výhody jsou samozřejmě vykoupeny vysokými investičními náklady, společně s velkými požadavky na provozní vstupy (hlavně energie). To ovšem může být v blízké budoucnosti zcela jinak.

Hydroponie je již standardní metodou pěstování rostlin, která se provádí bez použití půdy. Namísto toho jsou kořeny rostlin ponořeny do vodního roztoku živin, který obsahuje veškeré potřebné živiny pro růst a vývoj. Hydroponie umožňuje rostlinám získat všechny nutrienty, které by jinak získávaly z půdy, přímo a efektivně.

Jedná se o inovativní a udržitelný způsob pěstování rostlin, který nabízí mnoho výhod a má široké využití v zahradnictví a také ve výzkumných laboratořích při hodnocení optimalizace výživy. Právě optimální výživou může pěstitel docílit intenzifikace fotosyntézy, rychlejšího růstu a větších výnosů plodin. Produkce je několikanásobná ve srovnání s polním pěstováním (například u rajčat v plně řízených podmínkách je výnos okolo 60 kg/m² ročně – to je 600 tun z hektaru!).

Struktura hydroponického systému:

1) Nádrž s roztokem živin: ve specializovaném zařízení (mixér hnojiv) se připravuje živný roztok pro závlahu a výživu rostlin. Tento roztok obsahuje všechny potřebné makro- i mikroživiny, které jsou nezbytné pro růst rostlin, jako jsou dusík, fosfor, draslík, vápník, železo atd.

2) Substráty nebo opory pro rostliny: rostliny mohou být umístěny do nádrže s volně plovoucími kořeny, nebo mohou být umístěny v substrátu, který podporuje kořenový systém rostliny

a zároveň udržuje rostlinu stabilní. Používají se chemicky inertní materiály, které neuvolňují látky do roztoku a nemění podmínky výživy a chemismus vody.

3) Cirkulace: roztok živin je cirkulován pomocí čerpadla, což zajišťuje, že kořeny rostlin mají neustálý přístup k živinám. Rozvody jsou plastové – buď formou náplavových stolů, nebo kapilární závlahou. Systém je doplněn o retenční záchytné nádrže pro použitý roztok.

Hydroponické systémy mohou být rozděleny do tří skupin:

1) Plovoucí systém či vodní kultura (Floating system, Deep water culture): rostliny jsou umístěny v plovoucích polystyrenových podložkách, které plavou na povrchu roztoku živin ve větších nádržích. Kořeny rostlin jsou ponořeny do živného roztoku, zcela zásadní je okysličování vody pro zajištění dostatečného přívodu kyslíku do kořenového systému rostlin. Jen tak lze zachovat funkční příjem vody a živin kořeny.

2) Technika živného filmu (Nutrient film technique): využívá tenký film vodního roztoku živin, který protéká trubkami nebo kanály, ve kterých jsou umístěny rostliny. Kořeny rostlin jsou vystaveny průchodu vodního roztoku živin, který je neustále cirkulován.

3) Substrátová hydroponie: je nejrozšířenější formou hydroponie. Rostliny se pěstují v inertním substrátu, do kterého jsou upevněny. Jako substrát se v komerční produkci běžně používá čedičová plst' (kamenná vlna), štěrky, kokosová vlákna, písek nebo další chemicky inertní materiály.

Výhodou hydroponie je optimalizace výživy rostlin. Kořeny mají přímý a okamžitý přístup ke všem potřebným živinám, což umožňuje optimální růst a vývoj rostlin. Hydroponické systémy rovněž spotřebovávají méně vody než tradiční zemědělské postupy, protože voda je recirkulována – opakovaně používána, včetně nespotřebovaných živin. Absence půdy výrazně snižuje riziko vzniku chorob a výskytu škůdců, což snižuje potřebu pesticidů. Rostliny v hydroponických systémech často rostou rychleji a produkují vyšší výnosy ve srovnání s půdním pěstováním, i vzhledem k lepší kontrole prostředí, včetně teploty, vlhkosti, pH a koncentrace živin. Podmínky tak mohou být přesně nastaveny pro optimální růst rostlin.

Pokročilejší metodou pěstování rostlin než výše uvedená hydroponie je aeroponie, která se vyznačuje kultivací rostlin ve vzduchu bez použití půdy nebo substrátu (i umělého). Kořeny jsou umístěny volně a jsou pravidelně mlženy vodným roztokem živin. Rostliny jsou zavěšeny nebo umístěny na oporách, často v uzavřených prostorách, například sklenících nebo růstových komorách.

Systém aeroponie používá aerosol, který rozprašuje vodní roztok živin na kořeny rostlin. Tento aerosol vytváří jemné kapénky, které jsou dostatečně malé na to, aby se usadily na povrchu kořenů, ale zároveň poskytovaly dostatečnou vlhkost a živiny. Kořenová část je uzavřena proti působení vnějšího prostředí a světla. Díky vzdušnému prostředí kolem kořenů mají rostliny snadný přístup ke kyslíku, což podporuje zdravý růst kořenového systému. Díky oxygenaci kořenů dochází k lepší absorpci živin a výrazně se snižuje riziko přemnožení patogenních mikroorganismů. Tato technika může hrát klíčovou roli v budoucnosti zemědělství, zejména ve městských prostředích, kde je důležité využít dostupný prostor co nejefektivněji. Pokud hodnotíme optimální výživu, pak podmínky jednoznačně nejlepší má právě aeroponie.

Mezi výhody aeroponie patří efektivní využití vody. Množství spotřebované vody je menší než u tradičního zemědělství, protože voda je využívána pouze pro kořeny rostlin a není plýtvána zavlažováním půdy. Vzhledem k tomu, že kořeny nejsou v půdě, je riziko přenosu půdních patogenů a chorob a růstu plevelů minimalizováno, což snižuje potřebu pesticidů i herbicidů. Díky lepší absorpci živin a kyslíku kořeny rostlin v aeroponických systémech mohou rychleji růst a vyvíjet se a vzhledem k absenci substrátu odpadá náklad na něj. Efektivita využití prostoru je vysoká, zejména ve vertikálních zahradách nebo v hydroponických farmách, kde lze získat vícenásobný výnos z jednotky plochy. Nicméně při technickém výpadku může dojít velmi rychle k zasychnutí a odumírání rostlin.

Ukázka rostlin pěstovaných metodou in vitro. Kultura obsahuje rostlinné druhy typické pro biotop rašelinišť, jako je mucholapka podivná (Dionaea muscipula) (zdroj: Zahradnická fakulta MENDELU; autor fotografie: Jana Čechová)

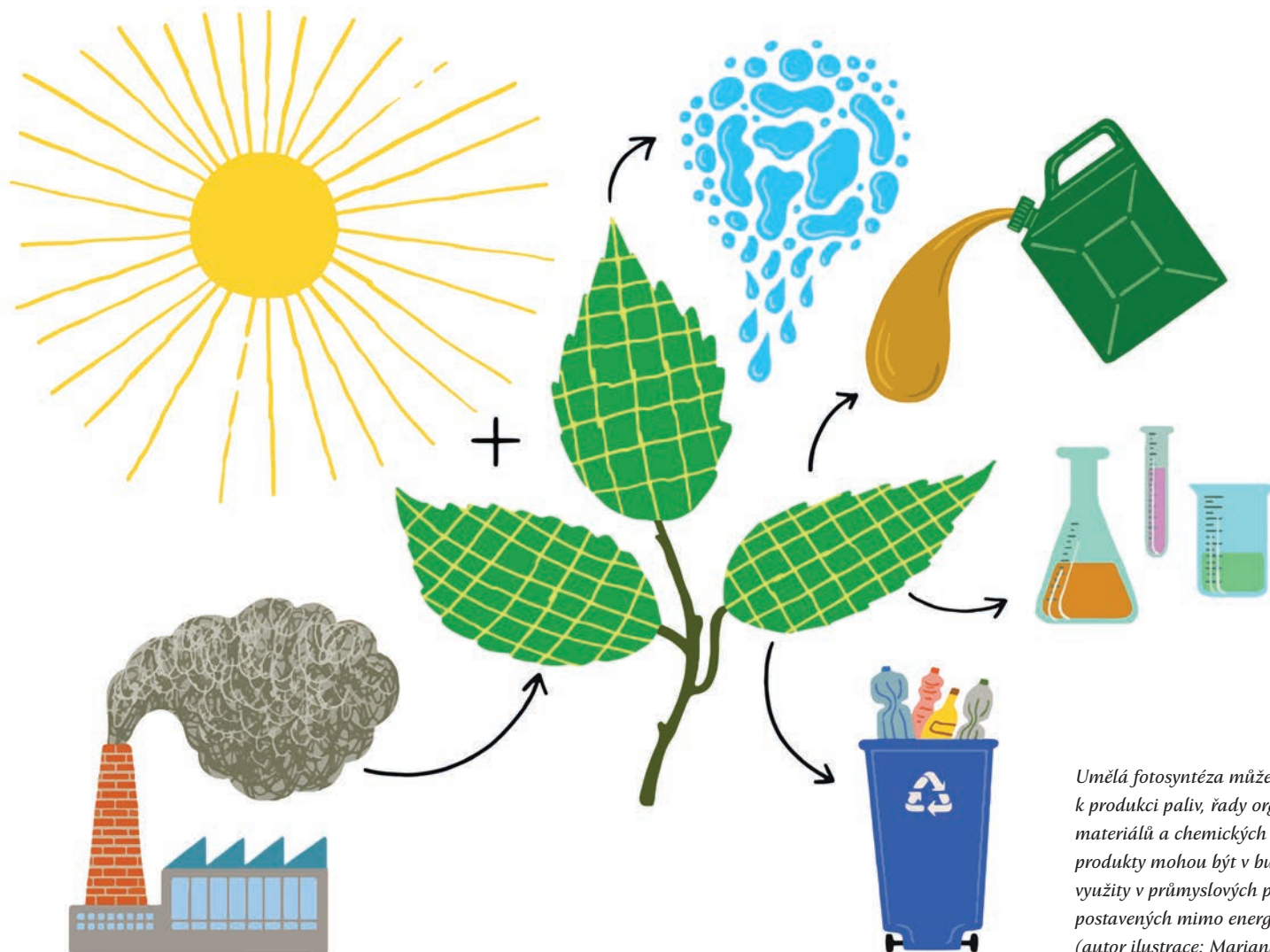


5.3 Fotosyntéza jako energie budoucnosti

5.3.1 Výzkum umělé fotosyntézy

Umělá fotosyntéza je rychle se rozvíjející oblast vědeckého výzkumu, která má potenciál zásadně změnit způsoby, jakými získáváme energii, a to zejména ve vztahu k obnovitelným zdrojům a boji proti klimatickým změnám. Snaží se vytvořit systémy na-

podobující přeměnu sluneční energie na chemickou, která může být ukládána a využívána v různých formách. Přírozená fotosyntéza, jak ji provádějí rostliny, ale i jiné organismy, má relativně malou účinnost, přibližně 1 %.¹⁶⁰ Umělá fotosyntéza se snaží účinnost zefektivnit pomocí pokročilých technologií a materiálů, jako jsou polovodiče a katalyzátory, které fungují jako umělý „list“. ¹⁶¹ Nesoustředí se na výrobu glukózy, ale zejména na tvorbu uhlíkově neutrálních paliv, jako je vodík, etanol, metan nebo jiné chemické sloučeniny. ¹⁶² Výroba paliv pomocí umělé fotosyntézy



Umělá fotosyntéza může být využita k produkci paliv, řady organických materiálů a chemických látek. Její produkty mohou být v budoucnu využity v průmyslových procesech postavených mimo energetické obory (autor ilustrace: Mariana Jiráková)

by v budoucnu mohla snížit naši závislost na fosilních palivech a následně zmírnit produkci škodlivých emisí a skleníkových plynů. Vznikl by tak obnovitelný zdroj energie, který je možno skladovat, transportovat a současně je čistější, efektivnější a méně škodlivý pro životní prostředí.

Kromě výroby paliv dokáže umělá fotosyntéza produkovat různé organické materiály a chemické látky, které mohou být v budoucnu využity v průmyslových procesech postavených mimo energetické obory.

V současnosti se výzkum umělé fotosyntézy intenzivně zaměřuje také na pěstování plodin bez přítomnosti světla. Tato myšlenka představuje revoluční přístup v zemědělství, který by v budoucnu mohl řešit problematiku narůstající světové populace a současně by mohl být uplatněn v extrémních podmínkách nebo omezených prostředích, jako jsou vesmírné stanice, městské farmy nebo oblasti s dlouhotrvajícími obdobími bez přirozeného světla.¹⁶³

Vývoj a aplikace umělé fotosyntézy jsou stále ve fázi výzkumu, ale její potenciál v oblasti energetiky a boji proti klimatickým změnám je obrovský a může se stát významným prvkem udržitelné budoucnosti a současně posílit globální energetickou bezpečnost.

5.3.2 Fotobioreaktory pro kultivaci mikrořas

Na evropském trhu se pohybuje bezmála 200 firem zabývajících se produkcí mikrořasové biomasy,¹⁶⁴ přičemž převážná většina výrobních kapacit je situována v jižní a severozápadní části Evropy. Jižní Evropa je vhodná pro kultivaci mikrořas¹⁶⁵ zejména

s ohledem na příznivé klimatické podmínky v průběhu převážné části roku. V severozápadní části Evropy jsou kultivační systémy často provozovány ve sklenících, kde je možné udržovat přijatelné teploty pro efektivní kultivaci a dosvěcovat prostory pomocí umělého osvětlení (převážně z obnovitelných zdrojů energie). Doba kultivace v průběhu roku je tam však v porovnání s jižní Evropou výrazně kratší.

V současné době je ve střední, východní a severní části Evropy pouze malé množství komerčně úspěšných průmyslových kultivačních systémů. Důvodem nižšího uplatnění jsou především nepříznivé klimatické podmínky (nízké teploty a množství slunečního záření), které značně zkracují dobu kultivace konvenčních druhů mikrořas v průběhu roku. S pokračujícím rozšiřováním portfolia druhů mikrořas také o druhy izolované v extrémních klimatických podmínkách (polární oblasti, ledovce) roste zájem o kultivaci mikrořas i v oblastech s méně klimaticky vhodnými podmínkami. V návaznosti na rostoucí poptávku rovněž dochází k vývoji nových kultivačních systémů pro růst mikrořas, označovaných jako fotobioreaktory.

Kultivační systémy pro produkci mikrořas, nejčastěji označované jako fotobioreaktory, slouží k úpravě provozních podmínek, které jsou pro správný růst mikrořas klíčové. Zjednodušeně řečeno, konstrukce fotobioreaktorů jsou koncipovány tak, aby veškeré vstupní suroviny v rámci probíhajících reakcí procesu fotosyntézy byly využívány co možná nejefektivněji pro růst mikrořasové biomasy. Mezi klíčové faktory podporující optimální růst fotosyntetických mikrořas patří dostatečné osvětlení (sluneční i umělé), dostupnost oxidu uhličitého a správné zásobení živinami, jako je dusík, fosfor, draslík a hořčík. Teplota prostředí, ve kterém se mikrořasy kultivují, také hraje klíčovou roli.¹⁶⁶ Různé druhy mikrořas vyžadují různé úrovně a spektra světelného záře-

160 Wikipedia, free encyclopedia, heslo Artificial photosynthesis, dostupné online na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_photosynthesis> [10. 5. 2024].

161 DURRANI, Jamie, Artificial photosynthesis harnesses forgotten half of sunlight's energy, Chemistry world 18. 3. 2018, dostupné online na: <<https://www.chemistryworld.com/news/artificial-photosynthesis-harnesses-forgotten-half-of-sunlights-energy/3008836.article>> [28. 5. 2024].

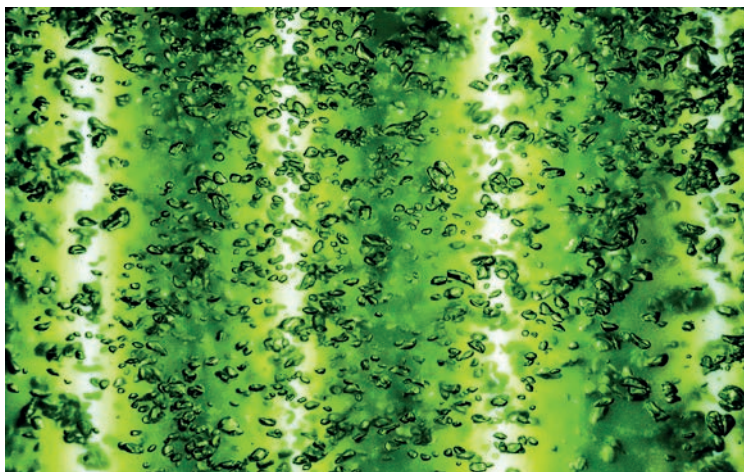
162 LERNER, Louise, Chemists create an 'artificial photosynthesis' system that is 10 times more efficient than existing systems, The University of Chicago, UChicagoNews, 10. 11. 2022, dostupné online na: <<https://news.uchicago.edu/story/chemists-create-artificial-photosynthesis-system-10-times-more-efficient-existing-systems>> [15. 5. 2024].

163 BOWLBY, Beatrice, Grow in the dark: photosynthesis that doesn't require sunlight, Biotechniques: The international journal of life science methods, 11. 7. 2022, dostupné online na: <<https://www.biotechniques.com/plant-climate-science/grow-in-the-dark-photosynthesis-that-doesnt-require-sunlight/>> [20. 7. 2024].

164 ARAUJO, Fernandes, D., S., R., Brief on algae biomass production, in: LUSSE, M. – SANCHEZ Lopez, J. – AVRAAMIDES, M. (eds.), Publications Office of the European Union, Luxembourg 2019.

165 Mikrořasy jsou jednobuněčné eukaryotické fotosyntetizující organismy, definice viz THORÉ, Eli, S., J. – MUYLAERT, Koenraad – BERTRAM, Michael, G. et al., Microalgae, Current Biology, 2023, 33(3), R91–R95.

166 MATA, Teresa, M. – MARTINS, António, A. – CEATANO, Nidia, S., Microalgae for biodiesel production and other applications: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14, s. 217–232.



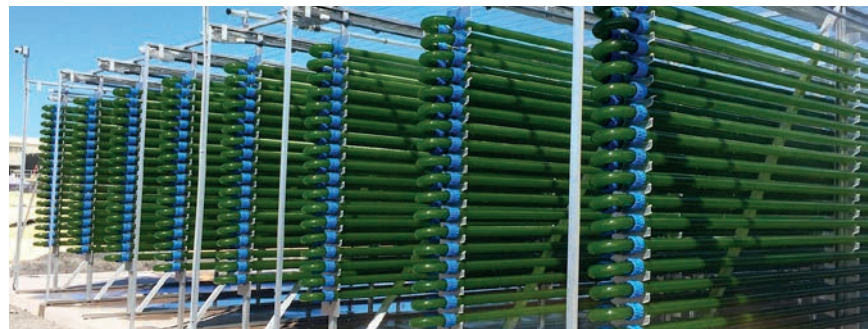
Detail mikrořasové kultury (zdroj: České vysoké učení technické v Praze)

ní. Koncentrace oxidu uhličitého a živin v prostředí, v němž se mikrořasy pěstují, může výrazně ovlivnit jejich růstové tempo.¹⁶⁷

Například některé konvenční mikrořasy, jako je např. *Chlorella*, jsou schopny růst při teplotách od 15 do 40 °C, zatímco jiné druhy, jako je *Phaeodactylum*, vyžadují úzký rozsah teplot mezi 20 a 25 °C.¹⁶⁸ Kontrola teploty je klíčová pro úspěšnou kultivaci mikrořas, což může být s ohledem na pestrost klimatických podmínek v Evropě poměrně složitě kontrolovatelné. V České republice mohou teploty omezovat venkovní kultivaci mikrořas v průběhu větší části roku, kdy průměrné teploty nepřesahují 15 °C.¹⁶⁹ Proces kultivace mikrořas při nižších teplotách je neefektivní a výtěžnosti jsou velmi malé.¹⁷⁰ Selektce vhodného kultivačního systému je klíčová, protože požadavky na provozní podmínky se mohou výrazně lišit v závislosti na druhu kultivovaných mikrořas a lokálních klimatických podmínkách.

Kultivační systémy lze rozdělit na tři základní skupiny dle konstrukčního uspořádání: otevřené, uzavřené a hybridní systémy. Otevřenost či uzavřenost kultivačního systému v zásadě určuje, jestli kultivační médium s mikrořasami přichází do přímého kontaktu s okolním prostředím. Hybridní systémy kombinují konstrukce otevřené a uzavřené. Uzavřené systémy oddělují zpracovávané kultivační médium od okolního prostředí pomocí průhledných součástí (desky, trubky). Uzavřené fotobioreaktory umožňují upravovat provozní podmínky dle požadavků kultivovaného druhu mikrořas, což vede ke snazší kontrole kvality finálních produktů z mikrořas. Dále je možné efektivněji využívat působení světelného záření a zamezovat kontaminaci zpracovávaných kmenů mikrořas.¹⁷¹ S množstvím transparentních součástek však výrazně narůstají také materiálové náklady pro stavbu fotobioreaktoru. Vyšší investiční a provozní náklady se následně promítnou i do vyšší ceny vyprodukované mikrořasové biomasy.

Uvádí se, že cena vyprodukované biomasy v uzavřených fotobioreaktorech je přibližně o 44 % vyšší než v otevřených kultivačních systémech.¹⁷² S ohledem na vyšší ceny je využití vyprodukovaných mikrořas většinou směřováno do oblastí výrobků



Trubkové fotobioreaktory (zdroj: České vysoké učení technické v Praze)

167 KUNJAPUR, Aditya, M. – ELDRIDGE, Bruce, R., Photobioreactor Design for commercial biofuel production from Microalgae, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49, s. 3516–3526.

168 MASOJÍDEK, Jiří, Mass cultivation of freshwater Microalgae, On-line database Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier: 2014.

169 Územní teploty, viz Český hydrometeorologický ústav, Územní teploty, 2024, dostupné online na:

<<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty>> [10. 5. 2024].

170 MOODY, Jeffrey, W. – MCGINTY, Christopher, M. – QUINN Jason, C., Global evaluation of biofuel potential from microalgae, Proceedings of the National Academy of Sciences U. S. A., 2014, 111, s. 8691–8696.

171 ACIÉN, Gabriel, F. – FERNÁNDEZ-SEVILLA, José, M. – MOLINA-GRIMA, Emilio, Photobioreactors for the production of microalgae, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2013, 12, s. 131–151.

172 NORSEKER, Niels-Henrik – NORSEKER, Maria, J. – BARBOSA, Marian et al., Microalgal production – A close look at the economics, Biotechnology Advances 29, 2011, s. 24–27.

s vyšší přidanou hodnotou, jako jsou např. nutriční, kosmetické a farmaceutické přípravky. Naopak u otevřených kultivačních systémů je velice obtížné kontrolovat a řídit provozní podmínky. Možnost kontaminace a složitost udržení požadované kvality produktu limituje tyto systémy na produkci mikrořasových produktů s nižší přidanou hodnotou, jako jsou např. biopaliva či biohnojiva. Ze stejného důvodu jsou často využívány také v konceptech biorafinérií zpracovávajících odpadní vody a plyny. Mikrořasová biomasa je tak často uvažována pouze jako vedlejší produkt. I přes nízké investiční a provozní náklady jsou otevřené systémy stále limitovány v dosažení většího průmyslového uplatnění zejména z hlediska vysokých požadavků na zástavbové plochy.

Otevřené průtočné kanály nebo nakloněné tenkovrstvé fotobioreaktory jsou nejčastěji využívanými otevřenými kultivačními systémy. Traťový fotobioreaktor je nejčastěji využívaným a konstrukčně nejjednodušším otevřeným kultivačním systémem. Kultivační médium s mikrořasovou biomasou cirkuluje v oválném kanále. Hloubka kanálu je konstruována tak, aby dopadající světelné záření mohlo penetrovat skrz vrstvu kultivačního média a dostalo se tak ke všem buňkám mikrořas. Schopnost efektivně využívat dopadající světelné záření výrazně závisí na promíchávání kultivačního média, které je společně s cirkulací zajištěno pomocí lopatkového oběžného kola. Na dně kanálu jsou umístěny aerační kameny, které do kultivačního média přivádějí směs vzduchu s oxidem uhličitým. Řízení provozních parametrů je v tomto fotobioreaktoru značně omezené, a proto se využívá pro kultivaci více odolných mikrořas a sinic. Traťové fotobioreaktory nacházejí uplatnění zejména v systémech biorafinérií zpracovávajících odpadní vody. Výhodou těchto fotobioreaktorů je schopnost zpracovávat velké množství kultivačního média. S rostoucím objemem kultivačního média však klesá schopnost dodávat efektivně světelné záření všem buňkám mikrořas. Celý proces fotosyntézy je tak tímto způsobem oslaben, což se projevuje v klesající produktivitě fotobioreaktoru.

Tenkovrstvé fotobioreaktory jsou tvořeny sérií kaskádovitě zapojených desek, přečerpávací nádobou a čerpadlem zajišťujícím cirkulaci kultivačního média s mikrořasovou biomasou. Nastavitelný přepad v horní části desek vytváří tenký film stékající postupně po kaskádách do přečerpávací nádoby. Vytvořená tenká vrstva kultivačního média eliminuje nevýhody traťového fotobioreaktoru s prostupností dopadajícího světelného záření skrz vrstvu kultivačního média. Tímto způsobem je možné při

efektivnějším ozařování buněk mikrořas dosáhnout vyšších výťažností biomasy. Nevýhodou je však malé množství zpracováváného kultivačního média vztažené na jednotku zastavěné plochy fotobioreaktoru. I přes snadnou možnost kontaminace zpracovávaného kultivačního média z okolního prostředí našly tenkovrstvé fotobioreaktory uplatnění v technologiích pro výrobu produktů s vyšší přidanou hodnotou. Převážná většina tenkovrstvých systémů je však využívána pro výrobu barviv, biohnojiv nebo krmiv pro zvířata a ryby.

V případě uzavřených systémů existuje nepřeberné množství konstrukčních variant. V průmyslovém měřítku v zásadě našly své komerční uplatnění pouze trubkové, deskové a válcové fotobioreaktory. Trubkový fotobioreaktor je tvořen sérií transparentních trubek, které jsou dimenzovány tak, aby dopadající světelné záření bylo schopné penetrovat skrz vrstvu proudícího média uvnitř trubek. Světelné záření je tak v rámci probíhajícího procesu fotosyntézy efektivně využíváno k růstu mikrořasové biomasy. Trubkové fotobioreaktory se dle způsobu rozložení trubek dělí na horizontální, vertikální či spirálové. Proudění kultivačního média je zajištěno čerpadlem. Uzavřenost systému také napomáhá prodloužit dobu zdržení aeračního plynu s oxidem uhličitým, což má za následek efektivnější přenos hmoty. Trubkové fotobioreaktory mohou být vybaveny i externími zadržovacími nádobami, které umožňují dodávat potřebné živiny nebo upravovat tepelné podmínky kultivačního média dle požadavků kultivovaného druhu mikrořas. Efektivní využití vstupní suroviny a možnost kontroly provozních podmínek umožňují využití trubkových fotobioreaktorů pro výrobu produktů s vyšší přidanou hodnotou pro potravinářský, kosmetický či farmaceutický průmysl.

Deskový fotobioreaktor je tvořen dvojicí transparentních desek, které vymezují prostor pro kultivační médium s mikrořasovou biomasou. Velké množství kultivačního média zpracovávané na malé zastavěné ploše staví deskový fotobioreaktor do pozice nevhodnějšího systému pro průmyslovou produkci mikrořasové biomasy. Vysoké provozní a údržbové náklady a potřebná konstrukční robustnost transparentních desek spojená s vysokými investičními náklady však limitují deskové fotobioreaktory k výrobě biomasy pro nevhodnější produkty z oblasti farmacie a potravinových doplňků.

Konstrukčně nejjednodušší ze skupiny uzavřených systémů se jeví válcový fotobioreaktor. Oxid uhličitý ve směsi se vzduchem je mikrořasám dodáván ve spodní části fotobioreaktoru prostřednictvím aeračního elementu. Nevýhodou válcových

fotobioreaktorů je však nízká efektivita využití dopadajícího světelného záření. V některých případech je tak proto využíváno dodatečného zdroje umělého světelného záření, které je instalováno uvnitř válcového fotobioreaktoru. Použití těchto fotobioreaktorů je limitováno pro menší či středně velké technologie, neboť s rostoucím objemem zpracovávaného média dochází k útlumu probíhajícího procesu fotosyntézy vlivem obtížné penetrace světelného záření ke všem buňkám mikrořas, což má za následek nízké produkce biomasy.

Zajímavou variantou uzavřeného fotobioreaktoru je modulární fotobioreaktor řízený umělou inteligencí (AI). Díky pokročilým počítačovým algoritmům a umělé inteligenci dokáže přístroj analyzovat různé faktory ovlivňující růst mikroorganismů a automaticky upravovat podmínky pro jejich optimální vývoj. To šetří čas, peníze i lidskou práci ve srovnání s tradičními metodami. Tento systém otevírá nové možnosti výzkumu a optimalizace mikroorganismů. Může například pomoci najít nové způsoby genetických úprav pro zvýšení produkce cenných látek nebo zlepšení schopnosti mikroorganismů čistit životní prostředí.

Na evropském trhu jsou uzavřené fotobioreaktory dominantní technologií tvořící 71 % celkové produkce. Otevřené kultivační systémy nachází větší uplatnění v zemích jižní Evropy, kde je počasí v průběhu roku stabilnější a je tak snazší udržovat optimální provozní podmínky pro správný růst mikrořas. Uzavřené fotobioreaktory naopak nacházejí větší uplatnění v severní či východní části Evropy, kde je nutné za účelem dosažení vyšší výťažnosti upravovat provozní podmínky (zejména světelné záření a teplota). Více než 54 % stávajících podniků dodává vyprodukovanou mikrořasovou biomasu do potravinářského průmyslu a krmivářského sektoru (23 % potravinové doplňky, 19 % krmiva pro zvířata, 12 % potraviny pro lidi). Významným odběratelem je také kosmetický průmysl, který odebírá 19 % celkové produkce, následovaný 8 % pro farmaceutický průmysl a 7 % pro přírodní hnojiva a biostimulanty. S převažující poptávkou po mikrořasových produktech s vyšší přidanou hodnotou lze očekávat, že bude docházet k výraznějšímu vývoji v oblasti uzavřených fotobioreaktorů.

Celková roční produkce mikrořas na evropském trhu v roce 2022 činila přibližně 324 tun mikrořasové sušiny. Vlastní výroba však nyní ani zdaleka nedokáže pokrýt evropskou poptávku po řasových produktech. Pokud by však Evropa využila veškerý svůj potenciál, lze předpokládat, že by byla do roku 2030 až jedna třetina všech mikrořasových produktů vyráběna na území

evropských států. Implementací fotobioreaktorů v konceptech biorafinérií by tak bylo možné ročně využít tisíce tun fosforu a dusíku obsaženého v odpadních vodách a 5,4 milionu tun emisí oxidu uhličitého z odpadních plynů. Vysoké výrobní náklady nebo obtížná transformace poznatků z laboratorního do průmyslového měřítká ovšem významně omezují komercializaci mikrořasové biomasy na výrobu produktů s vyšší přidanou hodnotou.

Vysoké investiční a provozní náklady způsobené náročnými lokálními podmínkami místa instalace omezují také širší komerční uplatnění kultivačních systémů. Plně komerčního uplatnění proto dosahují kultivační systémy pouze v lokalitách s větším množstvím slunečního záření a vyššími teplotami v průběhu roku (převážně jižní Evropa, část západní Evropy). Z tohoto důvodu jsou realizace těchto technologií v dnešní době v podmínkách České republiky poměrně limitované. Možným řešením by mohl být vývoj fotobioreaktorů pro kultivaci mikrořas izolovaných v oblastech s extrémními klimatickými podmínkami. Důležitým aspektem potenciálního úspěchu tak budou technická řešení kultivačních technologií schopných uzpůsobit své provozní parametry klimatickým podmínkám České republiky, které se minimálně z pohledu kultivace mikrořas jeví jako extrémní.

Využití tohoto zařízení může vést k významným objevům a inovacím v oblasti biotechnologií a lékařství. Vědci tak mohou efektivněji zkoumat a vylepšovat mikroorganismy pro různé účely, od výroby léků až po ochranu životního prostředí.

6. FOTOSYNTÉZA MNOHA TVÁŘÍ

6.1 Chytré rostliny aneb umění adaptace

Z toho, co jsme se dozvěděli v předchozím textu, vyplývá, že rostliny potřebují k provádění fotosyntézy dostatek světla, vody a oxidu uhličitého. Ovšem stejně jako u všeho dalšího platí, že čeho je moc, toho je příliš.

Například čím více světla na rostlinu dopadá, tím intenzivněji fotosyntetizuje. Rostlina je citlivý živý organismus, a tak od určité intenzity světelné saturace již rychlost fotosyntézy nestoupá, ba naopak, příliš silné ozáření poškozuje její fotosyntetický aparát. Ostatně i lidé, kteří se vystaví příliš silným paprskům slunce, si spálí pokožku.¹⁷³ Problémem je i teplota, která stoupá s intenzitou záření. Fotosyntetické optimum se nachází mezi 5–35 °C, při vyšších a nižších teplotách se zpomaluje (při příliš nízké



Hospodářsky nejvýznamnější C4 rostlinou je kukuřice (Zea mays, materiál: fotografie; inv. č. 108221, číslo negativu a35053/1; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)

teplotě se zpomaluje metabolismus rostlin, při vysoké se zase zrychluje respirace a tím dochází ke zvýšené spotřebě asimilátů, a tedy poklesu čistého výtěžku fotosyntézy).

Aby toho nebylo málo, rostliny se v suchozemském prostředí musí často vypořádat i s nedostatkem vody, která je dalším limitujícím faktorem fotosyntézy. Pokud je jí nedostatek, rostliny uzavírají průduchy, aby zabránily ztrátě vody odparem, a zastavují fotosyntézu. Při nedostatku vody se mohou navíc mechanicky poškodit přehřátím, protože se nemohou ochlazovat transpirací. Tuto potíž řeší různými adaptacemi – některé rostliny se snaží „najít“ vodu pomocí velmi dlouhých kořenů, jiné volí dormanci a období sucha přecházejí zapouzdřené v podobě odolných se-

men, hlíz aj. Některé se snaží omezit ztrátu vody potažením pokožky silnou vrstvou vosku, omezením plochy nadzemních částí atd.

Limitujícím faktorem může být i množství oxidu uhličitého. V době, kdy je stoupající hladina skleníkového plynu oxidu uhličitého probírána ze všech stran, se zdá být neuvěřitelné, že ho rostliny mohou mít málo, ale je tomu tak. Když sinice a rostliny kdysi v prahorách začaly fotosyntetizovat, byl oxid uhličitý hlavní součástí zemské atmosféry. Ovšem sama fotosyntéza atmosféru zcela změnila – přibýlo kyslíku a oxidu uhličitého výrazně ubylo. Při snížení hladiny oxidu uhličitého se projevila nežádoucí aktivita enzymu RuBisCO (podrobněji k němu viz podkapitola

2.1.1, Fotosyntéza jako biochemický děj). RuBisCO má vyšší afinitu k oxidu uhličitému než ke kyslíku. Pokud ale hladina oxidu uhličitého v atmosféře klesne pod určitou mez, enzym na sebe naváže místo oxidu uhličitého kyslík.

S tímto problémem se rostliny potýkají cca posledních 10 milionů let, kdy hladina oxidu uhličitého v atmosféře klesla pod 0,05 % objemu vzduchu, až dodnes, kdy koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu je cca 0,04 %. To znamená, že kyslíku je v atmosféře 600krát více než oxidu uhličitého, a tak RuBisCO není nasyceno a částečně na sebe váže kyslík.

Rostlina tak musí uhlík „zachraňovat“ pomocí energeticky náročného procesu zvaného fotorespirace, kterého se kromě chloroplastů účastní též mitochondrie a peroxizomy. Tímto procesem ale rostlina získá jen 2/3 z možného množství uhlíku, o jednu třetinu přijde, protože ho vydechne ve formě oxidu uhličitého. V tomto ohledu se fotorespirace podobá dýchání, ovšem probíhá jen za světla (odtud název složený z foto – světlo a respirace – dýchání). Protože je fotorespirace energeticky náročná a ne tak efektivní jako fotosyntéza, je její významné užívání pro rostlinu nevýhodné. Navíc intenzita fotorespirace opět stoupá s teplotou.

Je tedy v zájmu rostlin obývajících teplá prostředí s vysokou intenzitou slunečního záření přizpůsobit se tak, aby zvýšily fotosyntetickou aktivitu a minimalizovaly účinky fotorespirace. Jak to dělají?

Jak již bylo uvedeno v podkapitole 2.1.1, Fotosyntéza jako biochemický děj, existují tři způsoby zapojení (asimilace) oxidu uhličitého do organických sloučenin: Calvinův, Hatch-Slackův a CAM cyklus. Tyto cykly se liší jednak v enzymatických systémech podmiňujících fixaci nebo přenos oxidu uhličitého na ribulózo-1,5-bisfosfát (RuBP), jednak v prvním stabilním produktu těchto reakcí. V případě Calvinova cyklu se u C3 rostlin na RuBP v přítomnosti enzymu RuBisCO váže přímo vzdušný kyslík a prvním stabilním produktem fotosyntézy je tříuhlíkatá sloučenina kyselina 3-fosfoglycerová (podle toho C3 cyklus). Tyto C3 rostliny rostou v mírném podnebném pásu a při vyšších teplotách a ozáření snižuje výnos jejich fotosyntézy fotorespirace.

Karboxylace RuBP však není jedinou cestou. Omezené množství dostupného oxidu uhličitého se pokusily vyřešit C4 rostliny využitím tzv. Hatch-Slackova cyklu.¹⁷⁴ V chloroplastech některých

rostlin, jako je například cukrová třtina, čirok, amarant, kukuřice, je enzym RuBisCO málo aktivní či neaktivní a oxid uhličitý se váže tak, že hydrogenuhličitán (HCO_3^-) reaguje s fosfoenolpyruvátem za vzniku oxalacetátu, tedy čtyřuhlíkaté sloučeniny (odtud rostliny C4).¹⁷⁵ Teplomilné C4 rostliny tak minimalizují účinky fotorespirace a zvyšují fotosyntetickou aktivitu.

CAM (Crassulacean Acid Metabolism) rostliny jsou další skupinou rostlin, která využívá obdobu Hatchova-Slackova cyklu. Patří sem sukulenty rostoucí v horkých a suchých oblastech, které mají pro omezení transpirace ve dne zavřené průduchy. Pro příjem oxidu uhličitého otevírají průduchy až v noci, kdy je většinou vlhko a chladno. Rostliny ale za tmy fotosyntetizovat nedokážou, proto přes noc uchovávají získaný oxid uhličitý ve sloučenině zvané malát. Ve dne pak z malátu oxid uhličitý zase odštěpí a ten pak vstupuje do fotosyntézy. V CAM rostlinách tedy probíhá fotosyntéza s minimální ztrátou vody.

6.2 Nefotosyntetizující rostliny

Jak již název napovídá, nezelené rostliny nedokážou fotosyntetizovat. To znamená, že si nemohou samy syntetizovat cukry a musí je s dalšími organickými látkami získávat ze svého okolí. Jsou to tedy heterotrofní konzumenti, stejně jako zvířata, na rozdíl od zelených rostlin, které patří mezi producenty.

Nezelené rostliny se živí jako parazité, kteří přijímají živiny (organické i anorganické látky) a vodu z těla hostitele, kterým je fotosyntetizující rostlina. Činí tak buď přímo, nebo přes mykorrhizní houby napojené na zelené rostliny, zpravidla stromy. Někdy bývají parazitické rostliny využívající houbová vlákna mylně řazeny mezi saprofyty, tedy organismy přijímající živiny z rozkládající se organické hmoty.

Mezi nezelené parazity patří například raflézie z tropických lesů jihovýchodní Asie s největšími a nejtěžšími květy na světě. Květ raflézie Arnoldovy má průměr až jeden metr a váží 10 kilogramů.

V naší přírodě najdeme hned několik druhů nefotosyntetizujících rostlin, konkrétně hnilák smrkový z čeledi vřesovcovitých, hlístník hnízdák z čeledi vstavačovitých, zárazy a podbílek šupinatý z čeledi zárazovitých a kokotici z čeledi svlačcovitých. Tyto rostliny už nepotřebují listy, proto mívají jejich listy podobu zakrnělých šupin.

174 VÍTÁMVÁS, P., Nová Botanika, c. d., s. 40.

175 ŠEBÁNEK, J. et al. Fyziologie rostlin, c. d., s. 152.



Velkolepý květ raflézie (*Rafflesia* sp.)

(autor fotografie: Antoine Hubert; VisualHunt; CC BY-ND 3.0)

Hnilák smrkový (*Monotropa hypopitys*) je světle žlutě zbarvený. Může se pochlubit jednou z nejpokročilejších adaptací na soužití s houbami. Hyfy (vlákna) houby vytvářejí na kořenech hniláku tzv. Hartigovu síť. Je to jakýsi vak, který zahluje povrch kořenu hniláku, do kterého houba proniká haustorií. Pomocí tohoto spojení jsou mezi organismy transportovány živiny.¹⁷⁶

Hlístník hnízdák (*Neottia nidus-avis*) patří mezi orchideje. Nemá průduchy, zato má zachovány chloroplasty s chlorofylem *a* a xantofyly. Přestože nefotosyntetizuje, sluneční světlo mu přece jen pomáhá vyrábět molekuly ATP, které jsou zdrojem energie.¹⁷⁷ Jeho jméno je odvozené od kořenů, které vytvářejí útvar podobný ptačímu hnízdu. Je nápadný žlutohnědými květy. Nadzemní orgány včetně květu vytvoří až sedm let po vzklíčení, po odkvětu nadzemní část odumírá a nová rostlina vzejde z kořenových vrcholů.¹⁷⁸

Podbílek šupinatý (*Lathraea squamaria*) je zbarvený do růžovo-fialova. Lodyha s květy vyrůstá na jaře a rychle odumírá, větši-



Podbílek šupinatý, *Lathraea squamaria* (autor fotografie: Miroslav Čeněk)

nu času rostlina tráví pod zemí. Přízemní části podbílku šupinatého vytvářejí mohutné trsy.¹⁷⁹

Čeď zázrazovitá (Orobanchaceae) zahrnuje dva rody rozšířené v Česku – zázaza (*Orobanche*, 13 druhů v ČR) a mordovka (*Phelipanche*, čtyři původní taxony v ČR¹⁸⁰). Zázaza byla poprvé popsána jako parazit rostlin čeledi bobovitých (Fabaceae).

176 BOTANY.cz, *Monotropa hypopitys* – hnilák smrkový / hniliak smrekový, dostupné online na: <<https://botany.cz/cs/monotropa-hypopitys/>> [10. 5. 2024].

177 VINTER, Vladimír, Rostliny pod mikroskopem; základy anatomie cévnatých rostlin, Olomouc 2009.

178 BOTANY.cz., *Neottia nidus-avis* – hlístník hnízdák / hniezdovka hlístová, dostupné online na: <<https://botany.cz/cs/neottia-nidus-avis/>> [10. 5. 2024].

179 BOTANY.cz, *Lathraea squamaria* – podbílek šupinatý / zubovník šupinatý, dostupné online na: <<https://botany.cz/cs/lathraea-squamaria/>> [10. 5. 2024].

180 KROUFEK, Roman – NEPRAŠ, Karel, Zázazy a mordovky, rostliny na hraně, Živa, 2010, 3, s. 114.

Odtud je odvozeno její latinské jméno, složené z výrazů *orobos* – čočka a *anchos* – škrtit, rdousit. Jejich květy vynikají pestrou škálou barev od bělavé, žluté či červené až po modrou, fialovou či hnědou. Parazitují přímo na hostitelské rostlině, houbového prostředníka nepotřebují.¹⁸¹ Na rozdíl od předchozích parazitů se nezaměřují na stromy, ale na byliny. Po napojení na kořeny hostitele vytvářejí jakousi podzemní hlízkou a teprve po načerpání dostateku živin vytvoří nadzemní orgány. Všechny druhy záraz na území Česka jsou vzácné a zařazené do Červeného seznamu ohrožených druhů. Rostou v lučních porostech na loukách, stepích, pastvinách a ve světlých lesích. V minulosti představovaly problém pro zemědělce, protože svým masovým výskytem v některých kulturách plodin významně snižovaly výnosy. Dnes je vzhledem k odlišným pěstební technologiím toto riziko minimální.¹⁸²

Mořský zadožábří plž Elysia clarki. „Fotosyntetizující“ plži rodu Elysia jsou vzhledem ke svému zelenému zbarvení nazýváni „lettuce snails“ (salátoví šneci) nebo „solar-powered slugs“ (slimáci na sluneční pohon). Dokáží využívat fotosyntézu jako zdroj energie (autor fotografie: James st. John; VisualHunt; CC. BY-SA 2.0)



Kokotice (*Cuscuta*) jsou většinou nezelené (částečně fotosyntetizovat zvládnou jen některé druhy) parazitické liány se silně redukovanými listy. Po vyklíčení dokáže kokotice najít svou hostitelskou rostlinu na základě charakteristických těkavých látek, které hostitelská rostlina vylučuje.¹⁸³ V Česku je významným parazitem invazní kokotice ladní (*Cuscuta campestris*), původem ze Severní Ameriky, napadající jeteloviny.¹⁸⁴

6.3 Fotosyntéza v říši zvířat

Kromě rostlin existují i mnohobuněční živočichové na sluneční pohon. Schopnost fotosyntézy získávají obvykle pozřením celé buňky řasy nebo sinice, která následně živočichovi poskytuje energii ve formě redukovaného uhlíku a na oplátku dostává od hostitele živiny. Všichni tito živočichové mají jednoduchou stavbu těla, v poměru k objemu velký povrch těla k umístění fotosyntetizujících symbiontů (u složitější stavěných plžů supluje velký povrch těla rozvětvené střevo) a žijí ve vodě. Schopnost získat fotosyntetizující endosymbionty je tak, zdá se, omezena na vodní prostředí. Symbionti uvěznění v těle hostitele nemohou volně putovat za světlem, proto je živočich často umísťuje do určitých partií těla, kde mají dostatek světla. Zajímavé je, že při-

Saxikolní lišejník misnička zední (Protoparmeliopsis muralis). Misnička na jednom z historických mezníků v aleji Muzea Ohrada, pobočky Národního zemědělského muzea (autor fotografie: Marie Voldřichová)



181 KROUFEK, R. – NEPRAŠ, K., Zárazy a mordovky, c. d., s. 114.

182 Tamtéž, s. 115.

183 RUNYON, Justin, B. – MESCHER, Mark, C. – DEMORAES, Consuelo, M., Volatile chemical cues guide host location and host selection by parasitic plants. Science, 2006, 313(5795), s. 1964–1967.

184 Agromanuál.cz, dostupné online na: <<https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/plevele/invazni-plevele-8-kokotice-ladni/>> [10. 9. 2024].

tomnost cizího organismu v těle živočicha nevyvolává odpověď imunitního systému. Naopak infekce jiným než symbiotickým organismem imunitní reakci vyburcuje.

Mezi fotosyntetizující živočichy patří zástupci kmenů houbovců (Porifera), koráli, sasanky a nezmaři z kmene žahavců (Cnidaria), praploštěnci (Acoelomorpha), sumky z kmene strunatců (Chordata) a někteří mlži a plži z kmene měkkýšů (Mollusca). Jedním z nich je zadožábří mořský plž *Elysia chlorotica* z pobřežních vod Atlantského oceánu. Ten je výjimečný tím, že si místo celé řasy či sinice opatřuje jen chloroplasty a dokáže stejně jako rostlina přežít jen s pomocí slunce a vody. Svým způsobem tak překračuje hranice mezi živočichy a rostlinami. Chloroplasty získává tzv. kleptoplastií, tedy odnětím chloroplastů původnímu majiteli. Tím je potrava plže, řasa *Vaucheria litorea*. Ukořistěné kleptoplasty se v plži dále nedělí a nejsou přítomny v jeho vajíčkách – larvy se línou hnědě zbarvené a teprve požíráním řas získávají vlastní chloroplasty a s nimi zářivě zelenou barvu. Požřené chloroplasty plži uskladňují do buněk lemujících jejich trávicí soustavu. Tam chloroplasty dokážou fungovat po celý život zvířete, i když ten není nijak dlouhý – pouhých 10 měsíců.¹⁸⁵

6.4 Botanické sbírky a výzkum klimatu

Muzea uchovávají rozsáhlé sbírky botanických vzorků, které mohou být cenným nástrojem pro výzkum dávných i recentních změn klimatu. Otisky průduchů zachované v rostlinných fosiliích mohou být použity jako nepřímé vodítko k odhadu teploty a hladiny oxidu uhličitého v atmosféře. Skrze průduchy probíhá výměna plynů – rostlina přijímá oxid uhličitý a uvolňuje kyslík a vodu v podobě odparu (podrobněji k průduchům viz podkapitola 3.1.1, Fotosyntéza jako biochemický děj). Obecně tak platí, že větší množství (hustota) průduchů značí méně oxidu uhličitého, a tedy i nižší globální teploty.¹⁸⁶ V dobách ledových bylo



Mariopteris muricata, kapradosemenná rostlina (materiál: slín s otiskem listového vějíře; lokalita: Vnitrosudetská pánev, Svatoňovice; datace: stáří cca 307 milionů let (karbon); inv. č. 68454; rozměry: 21 x 15 cm, uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)

kupříkladu méně oxidu uhličitého ve vzduchu (cca 0,019 %) a stejné druhy rostlin tak měly více průduchů než v dobách mezi- ledových, kdy byl obsah oxidu uhličitého v atmosféře vyšší (cca 0,029 %).¹⁸⁷ Hustotu průduchů ovlivňuje i vlhkost prostředí – rostliny rostoucí v aridních podmínkách mají menší počet zanořených průduchů a otevírají je jen v noci, což jim umožňuje lépe hospodařit s vodou.¹⁸⁸

Dalším ze způsobů, jak odvodit historickou koncentraci oxidu uhličitého ve vzduchu, je poměr izotopů uhlíku ¹²C a ¹³C ve vzorcích rostlinné hmoty starých několik milionů let či jen několik století. Izotopové analýzy tak potvrdily recentně probíhající zvyšování koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře, které je nejvyšší za posledních 23 milionů let a stoupá rychlostí, jaká nemá v historii Země obdoby. Tento nárůst má počátek na začátku 19. století, v době průmyslové revoluce.¹⁸⁹

Rostlinné herbáře v muzejních sbírkách mohou být využity ke studiu globálních klimatických změn i v průběhu tzv. antropo-

185 RUMPHO, Mary, E. – PELLETREAU, Karen, N. – MOUSTAFA, Ahmed et al., The making of a photosynthetic animal, Journal of Experimental Biology, 2011, 214(2), s. 303–311.

186 Understanding evolution, Stomata indicators of CO₂ and temperature, UC Museum of paleontology, Berkeley university of California, dostupné online na: <<https://evolution.berkeley.edu/teach-resources/stomata-3-of-3-indicators-of-co2-and-temperature/>> [10. 7. 2024].

187 VAN DE WATER, Peter, K. – LEAVITT, Steven, V. – BETANCOURT, Julio, L., Trends in stomatal density and ¹³C/¹²C ratios of *Pinus flexilis* needles during last glacial – interglacial cycle, Science, 1994, 264(5156), s. 239–243.

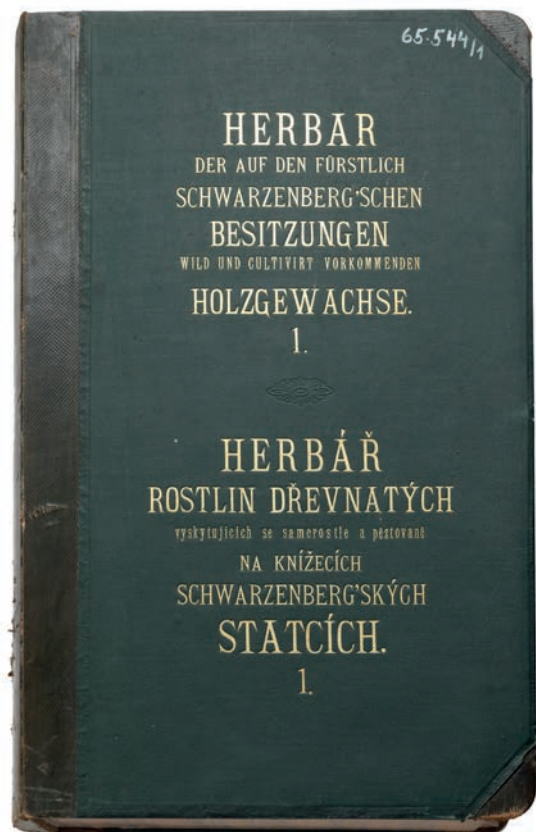
188 Těto adaptivní vlastnosti lze využít i při kultivaci zemědělských plodin. V současnosti probíhají pokusy s geneticky modifikovanou rýží, která má díky sníženému množství průduchů menší nároky na závlahu a může tak být pěstována i v sušším prostředí a za menší spotřeby vody. V Rakousku probíhá experimentální pěstování suchu odolnějších odrůd rýže pod záštitou rodu Lichtenštejnů. K dalšímu čtení viz CAINE, Robert, S. – YIN, Xiaojia – SLOAN, Jennifer et al., Rice with reduced stomatal density conserve water and has improved drought tolerance under future climate conditions, New Phytologist, 2018, 221(1), s. 371–384.

189 CUI, Ying – SHUBERT, Brian, A. – JAHREN, Hope, A., A 23 m. y. record of low atmospheric CO₂, Geology, 2020, 48(9), s. 888–892.

cénu, tedy období, kdy člověk již svou činností ovlivňuje zemský ekosystém. Vymezení tohoto období značně kolísá – někteří autoři kladou jeho počátek do období vzniku zemědělství před cca 8 000 lety, jiní do počátku 19. století, kdy se průmyslová revoluce stala zdrojem nárůstu uhlíku a metanu v atmosféře. Podle v současnosti převládajícího názoru započal antropocén

v 50. letech 20. století, kdy se vliv člověka stal skutečně globálním a půdu kontaminovaly umělé radioaktivní částice v důsledku jaderných testů.¹⁹⁰

Herbářové vzorky nám mohou odhalit změny klimatu prostřednictvím posunů v rozšíření taxonů i měnících se vztahů rostlin a herbivorního hmyzu, které odrážejí klimatem vyvolané změny v trofických řetězcích.¹⁹¹ Až do první dekády 21. století bylo jejich využití omezené.¹⁹² Digitalizace sbírek v posledních letech umožnila badatelům lepší přístup k herbářům a jejich využití v řadě vědeckých oborů. Kromě tradiční taxonomie se staly důležitým zdrojem velkého množství genetických a biogeografických dat přispívajících k pochopení světové bio-



Herbář rostlin dřevnatých, vyskytujících se samorostle a pěstované na knížecích schwarzenberských statcích (materiál: herbář; datace: 1870; inv. č. 65544; uložení: Sbirka Národního zemědělského muzea)



190 WATERS, Colin, N. – TURNER, Simon – MARTIN, Head, J., Candidatesites and other reference sections for the Global boundary Stratotype Section and Point of the Anthropocene series, *The Anthropocene Review*, 2023, 10(1), s. 3–23.

191 MEINEKE, Emily, K. – DAVIES, Jonathan, T., Museum specimens provide novel insights into changing plant-herbivore interactions, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2019, 374(1763), 20170393.

192 JOHNSON, Kenneth, G. – BROOKS, Stephen, J. – FENBERG, Phillip, B. et al., Climate Change and Biosphere Response: Unlocking the Collections Vault, *BioScience*, 2011, 61(2), s. 147–153.

diverzity a klimatických změn.¹⁹³ Stovky milionů vzorků rostlin a hub v muzejních sbírkách přesto stále skrývají obrovský potenciál pro studium globálních změn, který doposud nebyl plně vytěžen.¹⁹⁴

Při užití herbářů jako vodítka k vědeckému výzkumu je však třeba vzít v potaz rozdíly ve sběratelských praktikách od 16. století až po současnost. Měnící se trendy mohou například vést k vyššímu či naopak nižšímu počtu listů či reprodukčních orgánů v uchovaných vzorcích. Tyto rozdíly pak mohou být mylně považovány za indikátor změn v prostředí.¹⁹⁵

Ve sbírce Národního zemědělského muzea se v současnosti nachází obsáhlá herbářová sbírka převážně z 19. a počátku 20. století, obsahující celkem 176 svazků. Zahrnuje následující herbáře: Hirschův herbář (43 svazků, sběry ze severních Čech, konkrétně okolí Lovosic, Šumavy a Hlubocka), jednosvazkovou sbírku lišejníků Šumavy Karla Kleina z Vimperka, vázaný herbář *Plantae turfosae dominii Wittingau, Bohemia* obsahující mechy i semené rostliny (sbíral Breitenlohner, datováno 1861), desetisvazkový nedatovaný *Systematische Zusammenstellung der in der in Österreich ohne oder unter leichtem Schutz im freien Lande ausdauernden Laubholzarten und Formen. Mit Berücksichtigung der in Frauenberger Baumschule und Umgebung sich befindlichen Arten und Formen*, signováno Vojtěch Mareš (vedoucí lesních školek na Hluboké), pětisvazkový Herbář rostlin dřevnatých vyskytujících se samorostle a pěstovaně na knížecích schwarzenberských statcích (stručně lokalizováno), třísavazkový *Hochfürstlich Schwarzenbergisches Forst-Herbar, Geschnk vom Fortmeister Johann von Sceure, 1908, Sammlung der auf den Domainen des regierenden Herrn Johann Adolf Fürsten zu Schwarzenberg vorkommenden wildwachsenden und kultivierten Gräser*, sestavil von F. Besecny, Verwalter in Plavnitz, 1873, třísavazkový *Herbar von Metze*, sestavil Johann Metze z rostlin na panství schwarzenberském rostoucích, uzavřeno 11. Oktober 1876, třísavazkový *Cryptogemische Schmrotzerpflanzen suf Forstgewächsen*, Jakob Jungbauer, jeden svazek datován 1847, šestisvazkový *Waldher-*

bar – eine Sammlung den heimischen und eingebürgerten fremden – in Wäldern und auf andern Förstplantzen vorkommenden Gewächse..., Jakob Jungbauer, 1847 (datace v 1. svazku), a stosvazkový *Ex Herbario Brittingeriano, herbář Evropy a ostatního světa, sestaven výměnou z několika herbářů* (např. z *Botanischer Tauchsverein in Wien*).¹⁹⁶

V budoucnosti by i tyto sbírky mohly badatelům poskytnout neocenitelné informace o proměnách flóry v závislostech na změnách globálního klimatu.

7. ZÁVĚR

Fotosyntéza je komplexní jev spoluutvářející podobu naší Země a přímo či nepřímo zasahující do většiny aspektů lidské činnosti. Svou podstatou se jedná o velmi široké a zároveň vysoce odborně náročné téma.

Kritický katalog k výstavnímu projektu Fotosyntéza se pokusil přístupnou formou nastínit alespoň část této složité problematiky v co nejširším tematickém záběru a poskytnout tak čtenářům obecný přehled o tomto jevu, nahlížený z různých úhlů. Publikace umožňuje čtenáři získat základní všeobecný přehled o tématu podaný formou stručných textů. Tyto mohou zájemcům dále posloužit jako odrazový můstek k případnému hlubšímu studiu jednotlivých dílčích aspektů souvisejících s fenoménem fotosyntézy.

Tematické okruhy v katalogu jsou rozvedenou formou textů k expozici Fotosyntéza, vypracovaných metodou řešerše odborných a populárně naučných materiálů. V katalogové části byly představeny předměty ze sbírkového fondu Národního zemědělského muzea a Národního muzea, související s řešenou tematikou.

Publikace v přirozené posloupnosti seznamuje čtenáře nejprve s mechanismem a základními pojmy týkajícími se procesu fotosyntézy, vývoje rostlinstva v nejširším významu a vlivu fotosyntézy na živou a neživou přírodu. Významná část textu je

193 HEBERLING, Mason, J. – PRATHER, Alan, L. – TONSOR, Stephen, J., The Changing Uses of Herbarium Data in an Era of Global Change: An Overview Using Automated Content Analysis, *BioScience*, 2019, 69(10), s. 812–822.

194 MEINEKE, Emily, K. – DAVIES, Jonathan, T. – DARU, Barnabas, H. et al., Biological collections for understanding biodiversity in the Anthropocene, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2018, 374(1763), 20170386.

195 KOZLOV, V., Mikchail – SOKOLOVA, Irina, V. – ZVEREV, Vitali et al., Changes in plant collection practices from the 16th to 21st centuries: implications for the use of herbarium specimens in global change research, *Annals of Botany*, 2021, 127(7), s. 865–873.

196 Podrobnější informace viz RIVOLA, Milan, Jihočeské herbáře, *Zprávy Československé botanické společnosti při ČsAV, Československá botanická společnost*, 12, 1968, s. 176–178.

vyhrazena fotosyntéze jako základu zemědělství a jejímu využití moderními technologiemi kultivace. V tomto bodu se publikace dotýká též aktuálních témat, jako je globální změna klimatu a její souvztažnost se změnami hladiny oxidu uhličitého v atmosféře, čímž je téma zasazeno do rámce aktuálního dění. Prostřednictvím stručných medailonků jsou rovněž představeny významné historické osobnosti, které se podílely na objevu a základním pochopení principiálních fotosyntetických dějů.

Autoři doufají, že výstava Fotosyntéza a kritický katalog přiblíží nejširší veřejnosti základní principy fotosyntézy a přispějí k její propagaci jako jednoho ze základních a nesmírně důležitých přírodních jevů.

8. SUMMARY

Photosynthesis. A critical catalogue.

Photosynthesis is a complex phenomenon that co-shapes our Earth and directly or indirectly affects most aspects of human activity. By its very nature, it is a very broad and at the same time highly technical topic.

The critical catalogue for the exhibition project Photosynthesis has attempted to outline at least a part of this complex issue in the broadest possible thematic scope in an accessible form and thus provide readers with a general overview of this phenomenon, viewed from different angles. The publication allows the reader to get a basic general overview of the topic in the form of concise texts. These can also serve as a springboard for a more in-depth study of the individual sub-aspects of the phenomenon of photosynthesis.

The thematic headings in the catalogue are elaborated in the form of texts on the Photosynthesis exhibition, developed by means of a search of specialist and popular science materials. In the catalogue part, objects from the collections of the National Museum of Agriculture and the National Museum, related to the topic under discussion, were presented.

The book introduces the reader, in a natural sequence, firstly to the mechanism and basic concepts concerning the process of photosynthesis, the development of vegetation in its broadest sense and the influence of photosynthesis on living and non-living nature. A significant part of the text is devoted to photosynthesis as the basis of agriculture and its use by modern culti-

vation technologies. At this point, the publication also touches on topical issues such as global climate change and its correlation with changes in atmospheric carbon dioxide levels, thus placing the subject in the context of current events. Important historical figures who have contributed to the discovery and basic understanding of fundamental photosynthetic processes are also introduced through brief medallions.

The authors hope that the exhibition Photosynthesis and Critical Catalogue will bring the basic principles of photosynthesis to the attention of the general public and contribute to its promotion as one of the fundamental and extremely important natural phenomena.

9. LITERATURA

ABAS, Naeem – KALAIR, Esmat – KALAIR, Anam et al., Nature inspired artificial photosynthesis technolgis for hydrogen production: barriers and challenges, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(41), s. 2087–2079.

ACIÉN, Gabriel, F. – FERNÁNDEZ-SEVILLA, José, M. – MOLINA-GRIMA, Emilio, Photobioreactors for the production of microalgae, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2013, 12, s. 131–151.

ANONYMUS, The State of the World's Forests 2020. In brief – Forests, biodiversity and people, Řím: Food and Agriculture Organization a United Nations Agriculture project 2020.

ARAUJO, Fernandes, D. S., R., Brief on algae biomass production, in: LUSSE, M. – SANCHEZ Lopez, J. – AVRAAMIDES, M. (eds.), *Publications Office of the European Union, Luxembourg*, 2019.

ASFAW, Solomon – LIPPER, Leslie, Managing climate risk using climate-smart agriculture. Managing climate risk through climate-smart agriculture, s. 4–5, in: *Food and agriculture organization of the United nations, Rome: United Nations*, 2016.

BARBER, James, Biological solar energy, *Philosophical transactions, series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1853), s. 1007–1023.

BARTHEL, Hans, Jonas, Soft tissue preservation in amber, 2022. PhD Thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

BECK, Charles B., Reconstructions of Archaeopteris, and further consideration of its phylogenetic position, *American Journal of Botany*, 1962, 49(4), s. 373–382.

BELL, Elizabeth, A. – BOEHNKE, Patrick – HARRISON, Mark, T. et al., Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(47), s. 14518–14521.

BENGTON, Stefan – SALLSTEDT, Therese – BELIVANOVA, Veneta – WHITEHOUSE, Martin, Three-dimensional preservation of cellular and subcellular structures suggests 1.6 billion-year-old crown-group red algae, *Public Library of Science Biology*, 2017, 15(3), e2000735.

BHOWMICK, Asmit – HUSSEIN, Rana – BOGACZ, Isabel et al., Structural evidence for intermediates during O₂ formation in photosystem II., *Nature* 2023, 617, s. 629–636.

BLANKENSHIP, Robert E., Early evolution of Photosynthesis, *Plant Physiology*, 2010, 154(2), s. 434–438.

BLANKENSHIP, Robert, E. – TIEDE, David, M. – BARBER, James et al., Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement, *Science* 2011, 332(805), s. 805–809.

BLAŽKOVÁ, Monika, Studium fotosyntézy na středních školách: nové experimenty a protokoly, diplomová práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Katedra experimentální biologie rostlin, Praha, 2009.

BOYCE, C., Kevin – HOTTON, Carol, L. – FOGEL, Marilyn, L. et al., Devonian landscape heterogeneity recorded by a giant fungus, *Geology*, 2007, 35(5), s. 399–402.

BOYCE, C. Kevin, How green was Cooksonia? The importance of size in understanding the early evolution of physiology in the vascular plant lineage, *Paleobiology*, 2008, 34(2), s. 179–194.

BRÁZDIL, Rudolf – TRNKA, Miroslav et al., Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost, Brno: Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, 2015.

BROCKS, Jochen, J. – LOGAN, Graham, A. – BUICK, Roger et al., Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes, *Science*, 1999, 285(5430), s. 1033–1036.

CAINE, Robert, S. – YIN, Xiaojia – SLOAN, Jennifer et al., Rice with reduced stomatal density conserve water and has improved drought tolerance under future climate conditions, *New Phytologist*, 2018, 221(1), s. 371–384.

CAMACHO, Antonio – WALTER, A., Xavier – PICAZO, Antonio et al., Photoferrotrophy: remains of an ancient photosynthesis in modern environments, *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8, 223–563.

CUI, Ying – SHUBERT, Brian, A. – JAHREN, Hope, A., A 23 m. y. record of low atmospheric CO₂, *Geology*, 2020, 48(9), s. 888–892.

DALRYMPLE, G., Brent, The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved. Special Publications, Geological Society of London, 2001, 190(1), s. 205–221.

DAZA, Juan D. – STANLEY, L., Edward – BOLET, Arnau et al., Enigmatic amphibians in mid-Cretaceous amber were chameleon-like ballistic feeders, *Science*, 2020, 370(6517), s. 687–691.

DELWICHE, Charles F. – TIMME, Ruth, E., Plants, *Current Biology*, 21(11), s. 417–422.

DESMARAIS, David, J., When did photosynthesis emerge on Earth? *Science*, 2000, 8, s. 1703–1705.

DIAMOND, Jared – BELLWOOD, Peter, Farmers and Their languages: The first expansions, *Science*, 2003, 300(5619), s. 597–603.

DIAMOND, Jared, Kolaps, Praha: Academia, 2005.

DUCHOŇ, František, Výživa a hnojení kulturních rostlin zemědělských, Praha: Česká akademie zemědělská, 1948.

FARMER, Edward, Jean Senebier's thoughts on experimentation and their relevance for today's researcher, *Archives des Sciences*, 2010, 63, s. 186–188.

FIELD, Christopher, B. – BEHRENFELD, Michael, J. – RANDERSON, James, T. et al., Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components, *Science* 1998, 281, s. 237–240.

FRICKER, David, M. – WILLMER, Colin, Stomata, Londýn: Chapman & Hall 2012.

GRANT, Richard, H., Partitioning of biologically active radiation in plant canopies, *Personal Perspectives*, 1997, 40, s. 26–40.

GOVINDJEE-KROGMANN, David, Discoveries in oxygenic photosynthesis (1727–2003): A perspective, *Photosynthesis Research*, 2004, 1(80), s. 15–57.

GUIRY, Michael D. How many species of algae are there? A reprise. Four kingdoms, 14 phyla, 63 classes and stillgrowing, *Journal of Phycology*, 2024, 60, 8037.

GULBRANSON, Erik, L. – MONTAÑEZ, Isabel, P. – TABOR, Neil, J. – LIMARINO, Oscar, Late Pennsylvanian aridification on the south western margin of Gondwana (Paganzo Basin, NW Argentina): A regional expression of a global climate perturbation, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 417, s. 220–235.

HAGEMEIER, Marc, Leaf and crown optical properties of five early-, mid- and late-successional temperate tree species and their relation to sapling light demand, *Forests*, 2019, 10(10), 925.

HEBERLING, Mason, J. – PRATHER, Alan, L. – TONSOR, Stephen, J., The changing uses of herbarium data in an era of global change: an overview using automated content analysis, *BioScience*, 2019, 69(10), s. 812–822.

HEIMHOFER, Ulrich – HOCHULI, Peter, A. – BURLA, Stephan, New records of Early Cretaceous angiosperm pollen from Portuguese coastal deposits: implications for the timing of the early angiosperm radiation, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2007, 144, s. 39–76.

HENDRY, G., F. – JONES, O., T., Haems and chlorophylls: comparison of unction and formation, *Journal of medical genetics*, 1980, 17, s. 1–14.

HETHERINGTON, Alistair, M. – WOODWAER, Ian, F., The role of stomata in sensing and driving environmental change, *Nature*, 2003, 424, s. 901–908.

HILL, Jane, F., Chemical Research on Plant Growth, A translation of Théodore de Saussure's *Recherches chimiques sur la Végétation*, New York: Springer, 2013.

HOBZA, Roman – HUDZIECZEK, Vojtěch, Cílené genové editace zemědělských plodin, *Živa*, 2022, 70(4), s. 154–155.

HOLZER, Sepp, Poušť, nebo ráj, Brno: Alman, 2014.

HOLZER, Sepp, Agrar-Rebellion Jetzt, Graz: Stocker Leopold Verlag, 2023.

HOUSE, Christopher, H. – OEHLER, Dorothy, Z. – SUGITANI, Koji et al., Carbon isotopic analyses of ca. 3.0 Ga microstructure simply planktonic autotrophs inhabited Earth's early oceans, *Geology*, 2013, 41(6), s. 651–654.

HU, Ruifa – HUANG, Xuesheng – HUANG, Jikun et al., Long-and short-term health effects of pesticide exposure: a cohort study from China, 2015, *PloS one*, 10(6), e0128766.

JOHNSON, Kenneth, G. – BROOKS, Stephen, J. – FENBERG, Phillip, B. et al., Climate Change and Biosphere Response: Unlocking the Collections Vault, *BioScience*, 2011, 61(2), s. 147–153.

JORDAN, I. King, The Columbian Exchange as a source of adaptive introgression in human populations, *Biology Direct*, 2016, 11, s. 1–8.

KAVKA, Bohumil – ŠINDELÁŘOVÁ, Jaroslava, Funkce zeleně v životním prostředí, Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1978.

KOZLOV, V., Mikchail – SOKOLOVA, Irina, V. – ZVEREV, Vitali et al., Changes in plant collection practices from the 16th to 21st centuries: implications for the use of herbarium specimens in global change research, *Annals of Botany*, 2021, 127(7), s. 865–873.

KROUFEK, Roman – NEPRAŠ, Karel, Zárazy a morderky, rostliny na hraně, Živa, 2010, 3, s. 114–117.

KUNJAPUR, Aditya, M. – ELDRIDGE, Bruce, R., Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49, s. 3516–3526.

LAIBLE, Philip, D. – HANSON, Deborah, K. – BUHRMASTER, James et al., Switching sides – Reengineered primary charge separation in the bacterial photosynthetic reaction center, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(2), s. 865–871.

LAMBERTZ, Markus, Phylogenetic placement, developmental trajectories and evolutionary implications of a feathered dinosaur tail in Mid-Cretaceous amber, *Current Biology*, 2017, 27(6), s. 215–216.

LAMONT, Byron B. – TIANHUA, He, Fossil flowers of phylica support a 250 Ma origin for Rhamnaceae, *Trends in Plant Science*, 2022, 27(11), s. 1093–1094.

LEDVINA, Miroslav – STOKLASOVÁ, Alena – CERMÁN, Jaroslav, *Biochemie pro studující medicíny*, I. a II. díl., Praha: Karolinum 2009.

MALVIYA, Shruti – SCALCO, Eleora – AUDIC, Stéphane et al., Insights into global diatom distribution and diversity in the world's ocean, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(11), E1516–E1525.

MÁSLO, Jan – ADOLT, Radim – KUČERA, Miloš – KOHN, Ivo, Národní inventarizace lesů v České republice – výsledky třetího cyklu 2016–2020, Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, 2023.

MASOJÍDEK, Jiří, Mass Cultivation of freshwater microalgae, On-line database Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier: 2014.

MATA, Teresa, M. – MARTINS, António, A. – CEATANO, Nidia, S., Microalgae for biodiesel production and other applications: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14, s. 217–232.

MCFADDEN, Geoffrey, I. – VAN DOOREN, Giel, G., Evolution: red algal genome affirms a common origin of all plastids, *Current Biology*, 2004, 14(13), R514–R516.

MCGARVEY, Jennifer – THOMPSON, Jonathan, R. – EPSTEIN, Howard, E. et al., Carbon storage in old-growth forests of the Mid-Atlantic: toward better understanding the eastern forest carbon sink, *Ecology*, 2015, 96(2), s. 311–317.

MEINEKE, Emily, K. – DAVIES, Jonathan, T. – DARU, Barnabas, H. et al., Biological collections for understanding biodiversity in the Anthropocene, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2018, 374(1763), 20170386.

MEINEKE, Emily, K. – DAVIES, Jonathan, T., Museum specimens provide novel insights into changing plant-herbivore interactions, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2019, 374(1763), 20170393.

MENŠÍK, Ladislav – VIK, Robert – PRETL, Silvan et al., Možnosti uplatnění internetu věcí (IoT) v precizním zemědělství v ČR, *Úroda*, 2019, XLIV(12), s. 341–350.

MIAO, Lanyun – YIN, Zongjun – KNOLL, Andrew, H. et al., 1.63-billion-year-old multicellular eukaryotes from the Chuanlinggou Formation in North China, *Science Advances*, 2024, 10(4), eadk3208.

MONTALUISA-MANTILLA, María, S. – GARCÍA-ENCINA, Pedro – LEBRERO, Raque et al., Botanical filters for the abatement of indoor air pollutants, *Chemosphere*, 2023, 345, 140483.

MOODY, Jeffrey, W. – MCGINTY, Christopher, M. – QUINN Jason, C., Global evaluation of biofuel potential from microalgae, *Proceedings of the National Academy of Sciences U. S. A.*, 2014, 111, s. 8691–8696.

MOORE, Kelsey, R., MAGNABOSCO, Cara, MOMPER, Lily et al., An expanded ribosomal phylogeny of cyanobacteria supports a deep placement of plastids, *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10, 1612.

MUSSELMAN, Robert, C. – FOX, Douglas, G., A review of the role of temperate forests in the global CO₂ balance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1991, 41(6), s. 797–807.

NÁTR, Lubomír, Fotosyntetická produkce a výživa lidstva. Přírodní vědy, Praha: Institut sociálních věcí, 2002.

NÁTR, Lubomír, Země jako skleník: proč se bát CO₂? Průhledy, Praha: Academia, 2006.

NEALSON, Kenneth, H. – CONRAD, Pamela, G., Life: past, present and future, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 1999, 354(1392), s. 1923–1939.

NEUBAUER, Thomas, A. – HAUFFE, Torsten – SILVESTRO, Danielle et al., Current extinction rate in European freshwater gastropods greatly exceeds that of the late Cretaceous mass extinction, *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1), s. 97.

NEUWIRTHOVÁ, Jitka, Transport oxidu uhličitého listem hypostomatických rostlin, České Budějovice, PřF JCU, 2015.

NORSKER, Niels-Henrik – NORSEKER, Maria, J. – BARBOSA, Marian et al., Microalgal production – A close look at the economics, *Biotechnology Advances* 29, 2011, s. 24–27.

OEHLER, Dorothy, Z. – FRANCOIS, Robert – WALTER, Malcolm, R. et al., NanoSIMS: insights to biogenicity and syn-
genicity of Archaeal carbonaceous structures, *Precambrian Research*, 2009, 173(1–4), s. 70–78.

OLDENBURG, Delene, J. – BENDICH, Arnold, J., DNA maintenance in plastids and mitochondria of plants, *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6, 883.

PAKŠINA, Světlana, M. – MALYAVKO, Vladimir – PETROVNA, Galina et al., Vlastnosti funkční závislosti výnosu zrna na transpiraci, in: *Bulletin Federální státní vzdělávací instituce vyššího odborného vzdělávání Brjanská státní zemědělská akademie*, 2015, 5, s. 24–30 (rusky).

PATON, Alan – BRUMMITT, Neil – GOVAERTS, Răfael et al., Towards Target 1 of the global strategy for plant conservation: A working list of all known plant species – progress and prospects, *Taxon*, 2008, 57(2), s. 602–611.

PAVLŮ, Lenka, Základy pedologie a ochrany půdy, Praha: Česká zemědělská univerzita, 2018, s. 42.

PERIS, David – JANSSEN, Kathrin – BARTHEL, H., Jonas et al., DNA from resin-embedded organisms: Past, present and future, *Public Library of Science*, 2020, 15(9), e0239521.

POINAR, George, Fossil record of viruses, parasitic bacteria and parasitic protozoa, in: *The Evolution and fossil record of parasitism: identification and macroevolution of parasites*. Cham: Springer International Publishing 2021. p. 29–68.

PRÁŠILOVÁ, Marie – HOŠKOVÁ, Pavla, The world population and its expected future evolution, *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2010, LVIII, No. 3, s. 197–206.

RAN, Liang – LARSSON, John – VIGIL-STENMAN, Theoden et al., Genome Erosion in a Nitrogen-Fixing Vertically Transmitted Endosymbiotic Multicellular Cyanobacterium, *Public Library of Science One*, 2010, 5(7), e11486.

RIVOLA, Milan, Jihočeské herbáře, Zprávy Československé botanické společnosti při ČsAV, Československá botanická společnost, 12, 1968, s. 176–178.

RUBINSTEIN, Claudia, V. – GERRIENNE, Phillippe, De La PUENTE, G., S. et al., Early Middle Ordovician evidence for land plants in Argentina (eastern Gondwana), *New Phytologist*, 2010, 188(2), s. 365–369.

RUML, Milan, Využití organické hmoty k energetickým účelům, *Zemědělská ekonomika* XXXIII, 1987, 6, s. 464 (resp. 463–468).

RUMPHO, Mary, E. – PELLETREAU, Karen, N. – MOUSTAFA, Ahmed et al., The making of a photosynthetic animal, *Journal of Experimental Biology*, 2011, 214(2), s. 303–311.

RUNYON, Justin B. – MESCHER, Mark, C. – DEMORAES, Consuelo, M., Volatile chemical cues guide host location and host selection by parasitic plants. *Science*, 2006, 313(5795), s. 1964–1967.

ŘÍMAN, Josef (ed.), Malá československá encyklopedie, VI. svazek Š–Ž, Praha: Academia, 1987.

SAHNEV, Sandra – BENTON, Michael, J. – FALCON-LANG, Howard, J., Rainforest collapse triggered Pennsylvanian tetrapod diversification in Euramerica, *Geology*, 2010, 38(12), s. 1079–1082.

SÁNCHEZ-BARACALDO, Patricia – RAVEN, John A. – PISANI, Davide et al., Early photosynthetic eukaryotes inhabited low-salinity habitats, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(37), E7737–E7745.

SECKBACH, Josef – GORDON, Richard, *Diatoms: Fundamentals and Applications*, Hoboken: John Wiley & sons 2019.

SIMPSON, G., B., Alastair – SLAMOVITS, Claudio, H. – ARCHIBALD, John, M., Protist diversity and eukaryote phylogeny, in: ARCHIBALD, John, M., *Handbook of the protist*, New York: Springer international publishing, 2017.

SHERWOOD, Lollar, B. – WESTGATE, T., D. – WARD, J., A. et al., Abiogenic formation of alkanes in the Earth's crust as a minor source for global hydrocarbon reservoirs, *Nature*, 2002, 416(6880), s. 522–524.

SMART, Matthew, S. – FILIPPELLI, Gabriel – GILHOOLY, William, P. et al., The expansion of land plants during the Late Devonian contributed to the marine mass extinction, *Communications Earth & Environment* 2023, 4(449).

SMÝKAL, Petr – NELSON, Matthew – BERGER, Jens et al., The impact of genetic changes during crop domestication, *Agronomy*, 2018, 8(7), 119.

SRIVASTAVA, Ashish K. – RAI, Amar N. – NEILAN, Brett A., *Stress Biology of Cyanobacteria: Molecular Mechanisms to Cellular Responses*, Boca Raton: Chemical rubber company press, 2013.

STEENWERT, Kerri, L. – HODSON, Amanda, K. – BLOOM, Arnold, J. et al., Climate-smart agriculture global research agenda: scientific basis for action, *Agriculture and Food Security*, 2014, 3, s. 1–39.

SUMMONS, Roger, E. – JAHNKE, Linda, L. – HOPE, Janet, M. et al., 2-Methyl hopanoids as biomarkers for cyanobacterial oxygenic photosynthesis, *Nature*, 1999, 400(6744), s. 554–557.

ŠEBÁNEK, Jiří, et al., *Fyziologie rostlin*, 1. vyd., Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1983.

TARBUCK, Edward, J., et al., *Earth: an introduction to physical geology*. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2005.

THOMPSON, Katherine, J. – KENWARD, Paul, A. – BAUER, Kohen, W. et al., Photoferrotrophy, deposition of banded iron formations, and methane production in Archean oceans, *Science advances*, 2019, 5(11), eaav2869.

THOMPSON, Michael – GAMAGE, Dananjali – HIROTSU, Naoki et al., Effects of elevated carbon dioxide on photosynthe-

sis and carbon partitioning: a perspective on root sugar sensing and hormonal crosstalk, *Frontiers of Physiology*, 2017, 8, 578.

THORÉ, Eli, S., J. – MUYLEAERT, Koenraad – BERTRAM, Michael, G. et al., Microalgae, *Current Biology*, 2023, 33(3), R91–R95.

VAN DE WATER, Peter, K. – LEAVITT, Steven, V. – BETANCOURT, Julio, L., Trends in stomatal density and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of *Pinus flexilis* needles during last glacial – interglacial cycle, *Science*, 1994, 264(5156), s. 239–243.

VENCLOVÁ, Sandra – CHERNOMORETS, Olga – LAURIN, Jiří et al., Largest fossil logs of Paraphyllanthoxylon-type from the Eastern Hemisphere (Upper Cretaceous, Czech Republic), *Cretaceous Research*, 2023, 147, 105506.

VINTER, Vladimír, Rostliny pod mikroskopem; základy anatomie cévnatých rostlin, Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009.

VODRÁŽKA, Zdeněk, *Biochemie 3*, Praha: Academia, 1993.

VOET, Donald – VOETOVÁ, Judith, *Biochemie*, Praha: Victoria Publishing, 1995.

VORONIN, Boris, A. – ČUPINA, Irina, P. – VORONINA, Jana, V., Особенности органического сельского хозяйства, АОН, 2019, 2.

WANG, Bei – LAN, Christopher, Q. – HORSMAN, Mark, Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses, *Biotechnology Advances*, 2012, 30, s. 904–912.

WATERS, Colin, N. – TURNER, Simon – MARTIN, Head, J., Candidatesites and other reference sections for the Global boundary Stratotype Section and Point of the Anthropocene series, *The anthropocene review*, 2023, 10(1), s. 3–23.

WESTBROOK, Anna, S. – MCADAM, Scott, A., M., Stomata density and mechanics are critical for high productivity: insights from amphibious ferns, *New Phytologist*, 2020, 229(2), s. 877–889.

XING, Lida – WANG, Donghao – LI, Gang et al., Possible egg masses from amphibians, gastropods, and insects in mid-Cretaceous Burmese amber, *Historical Biology*, 2021, 33(7), s. 1043–1052.

XI-LIU, Y., U., E. – QING-XIAN, G., A., O., Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions, *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(4), s. 243–252.

ZÁDOROVÁ, Tereza – PENÍŽEK, Vít, Základy půdní klasifikace I., skripty, Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra pedologie a ochrany půd, 2020.

ZHANG, Zhe – LV, Yingmin – PAN, Huitang, Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks, 2013, 12(3), s. 323–329.

ZHU, Shixing – ZHU, Maoyan – KNOLL, Andrew, H. et al., Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China, *Nature communications*, 2016, 7(1), 11500.

Online zdroje:

- **BAILEY, Regina**, Jan Ingenhousz: scientist who discovered photosynthesis, ThoughtCo., dostupné online na: <<https://www.thoughtco.com/jan-ingenhousz-4571034>> [28. 7. 2024].

- **BOWLBY, Beatrice**, Grow in the dark: photosynthesis that doesn't require sunlight, *Biotechniques: The international journal of life science methods*, 11. 7. 2022, dostupné online na: <<https://www.biotechniques.com/plant-climate-science/grow-in-the-dark-photosynthesis-that-doesnt-require-sunlight/>> [20. 7. 2024].

- **BUFKA, Aleš – MODLÍK, Miloslav – DOKOUPIL, Dušan**, Ministerstvo průmyslu a obchodu, Energetická statistika, Uhlí v České republice 2012–2022, Ministerstvo průmyslu a obchodu, dostupné online na: <https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/statistika/tuha-paliva/2024/2/Uhli-2012-2022_2.pdf> [6. 9. 2024].

- **DURRANI, Jamie**, Artificial photosynthesis harnesses forgotten half of sunlight's energy, Chemistry world 18. 3. 2018, dostupné online na: <<https://www.chemistryworld.com/news/artificial-photosynthesis-harnesses-forgotten-half-of-sunlights-energy/3008836.article>> [28. 5. 2024].
- **GRESHKO, Michael**, How amber creates exquisite fossils, National Geographic, dostupné online na: <<https://www.nationalgeographic.com/science/article/what-is-amber-fossils-science>> [20. 5. 2024].
- **CHEN, Na**, Oldest Fossils of Multicellular Eukaryotes Found in North China, Chinese academy of Sciences, 26. 1. 2024, dostupné online na: <https://english.cas.cn/newsroom/cas_media/202401/t20240126_656735.shtml> [15. 4. 2024].
- **KRÁLOVÁ, Magda**, Vrstvy v atmosféře, Techmania Science center, Eduportál, dostupné online na: <<https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/atmosfera/vrstvy-v-atmosfere>> [6. 9. 2024].
- **LERNER, Louise**, Chemists create an 'artificial photosynthesis' system that is 10 times more efficient than existing systems, The University of Chicago, UChicagonews, 10. 11. 2022, dostupné online na: <<https://news.uchicago.edu/story/chemists-create-artificial-photosynthesis-system-10-times-more-efficient-existing-systems>> [15. 5. 2024].
- **MAGUIRE, Gavin**, Fossil fuels still dominate global power system, Reuters, 30. listopadu 2023, dostupné online na: <<https://www.reuters.com/markets/commodities/fossil-fuels-still-dominate-global-power-systems-2023-11-30/>> [15. 4. 2024].
- **MARSHALL, Michael**, Photosynthesis is still a mystery – but science is revealing unknown steps, National Geographic, 15. 5. 2023, dostupné online na: <<https://www.nationalgeographic.com/premium/article/photosynthesis-still-a-mystery-science-revealing-unknown-steps>> [15. 4. 2024].
- **MISHRA, Stuti**, Big oil is coming for dinner: Fossil fuel are entrenched across global food system, report warns, Independent, 2. 11. 2023, dostupné online na: <<https://www.independent.co.uk/climate-change/news/food-processing-carbon-emissions-climate-b2439739.html>> [15. 4. 2024].
- **SCHEJBALOVÁ, Jana – ČERMÁKOVÁ, Milada**, Balmerova série, Současné trendy vědy a moderních technologií, 2016–2017, přednáška, dostupné online na: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3A%2F%2Fyzu3v.fjfi.cvut.cz%2Fcurrent%2Fweb%2Fprednasky%2F15-17ZaverecnePrace%2FBALMEROVA_SERIE.pptx&wdOrigin=BROWSELINK> [15. 4. 2024].
- **SMIL, Václav**, Energie – průvodce pro začátečníky, Kniha Zlín, 2018, in: Sciencemag.cz, 31. 7. 2018, dostupné online na: <<https://sciencemag.cz/fotosynteza-a-jeji-ucinnost/>> [15. 4. 2024].
- **SMOLOVÁ, Irena**, Půdní poměry ČR, Univerzita Palackého v Olomouci, dostupné online na: <<https://geography.upol.cz/soubory/lide/smolova/GCR1/Pudni%20pomery%20text.pdf>> [15. 4. 2024].
- **THAN, Ker**, Early Earth Was Purple, Study Suggests, Live Science, 14. 10. 2022, dostupné online na: <<https://www.livescience.com/1398-early-earth-purple-study-suggests.html>> [25. 4. 2024].
- **VÍTÁMVÁS, Pavel**, Nová Botanika, 2020, 2, s. 39–41, dostupné online na: <http://www.novabotanika.eu/Vitamvas_NB2020_2.pdf> [10. 5. 2024].
- **Akademie věd české republiky**, Fascinující mikrořasy: pradávné organismy prospěšné nejen pro lidské zdraví, dostupné online na: <<https://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/biologie-a-lekarske-vedy/Fascinujici-mikrorasy-Pradavne-organismy-prospesne-nejen-pro-lidske-zdravi/>> [10. 5. 2024].
- **American chemical society**, Joseph Priestley, Discoverer of Oxygen: International historic chemical landmark., dostupné online na: <<https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/josephpriestleyoxygen.html>> [19. 5. 2024].
- **An online flora of all known plants**, dostupné online na: <<https://worldfloraonline.org/>> [19. 5. 2024].

- **BOOKRAGS, Gale**, World of biology on Jean Senebier, dostupné online na: <<https://www.bookrags.com/biography/jean-senebier-wob/#gsc.tab=0>> [15. 7. 2024].
- **BOTANY.cz**, Monotropa hypopitys – hnilák smrkový / hniliak smrekový, dostupné online na: <<https://botany.cz/cs/monotropa-hypopitys/>> [10. 5. 2024].
- **BOTANY.cz**, Neottia nidus-avis – hlístník hnízdák / hniezdovka hlístová, dostupné online na: <<https://botany.cz/cs/neottia-nidus-avis/>> [10. 5. 2024].
- **BOTANY.cz**, Lathraea squamaria – podbílek šupinatý / zubovník šupinatý, dostupné online na: <<https://botany.cz/cs/lathraea-squamaria/>> [10. 5. 2024].
- **Brittanica**, heslo Green revolution, dostupné online na: <Green revolution | Definition, Advantages, Importance, & Facts | Britannica> [21. 6. 2024].
- **CO2 LEVELS.ORG**, dostupné online na: <<https://www.co2levels.org/>> [21. 6. 2024].
- **Česká geologická služba**, Geologická encyklopedie online, dostupné online na: <<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>> [10. 5. 2024].
- **Česká geologická služba**, půdní mapa 1 : 50 000, dostupné online na: <<https://mapy.geology.cz/pudy>> [15. 4. 2024].
- **Český hydrometeorologický ústav**, Územní teploty, 2024, dostupné online na: <<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty>> [10. 5. 2024].
- **EcoTree**, dostupné online na: <<https://ecotree.green/en/how-much-co2-does-a-tree-absorb>> [28. 6. 2024].
- **Energy education**, dostupné online na: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal_types> [6. 9. 2024].
- **ESCWA Water Resources Section**: Coastal Aquifer Basin, s. 498–499, dostupné online na: <waterinventory.org/groundwater/coastal-aquifer-basin> [28. 6. 2024].
- **Fakta o klimatu, Vývoj světových emisí CO₂**, dostupné online na: <<https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-co2-svet-vyvoj>> [10. 5. 2024].
- **Heilbronn Stadtarchiv**, Robert Mayer, dostupné online na: <<https://stadtarchiv.heilbronn.de/stadtgeschichte/geschichte-a-z/m/mayer-robert.html>> [7. 6. 2024].
- **International energy agency (IEA)**, dostupné online na: <<https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal>> [6. 9. 2024].
- **INTERSUCHO**, dostupné online na: <<https://www.intersucho.cz/cz/?from=2024-07-08&to=2024-08-05¤t=2024-08-04>> [7. 6. 2024].
- **Kanál YouTube**, dostupné online na: <https://www.youtube.com/results?search_query=fotosynt%C3%A9za> [15. 4. 2024].
- **Ministerstvo životního prostředí, Komplexní studie dopadů, zranitelnosti a zdrojů rizik souvisejících se změnou klimatu v ČR**, Český hydrometeorologický ústav, 2019, dostupné online na: <[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/studie_dopadu_zmena_klimatu/\\$FILE/OEOK-Aktualizovana_studie_2019-20200128.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/studie_dopadu_zmena_klimatu/$FILE/OEOK-Aktualizovana_studie_2019-20200128.pdf)> [15. 4. 2024].
- **Masarykova univerzita v Brně**, Vznik ropy, prezentace, dostupné online na: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/G9301/um/panevka_ropa_2012.pdf> [10. 5. 2024].
- **Národní zdravotnický informační portál**, dostupné online na: <<https://www.nzip.cz/rejstrikovy-pojem/2591>> [6. 9. 2024].
- **Optimtop**, dostupné online na: <<https://www.optimtop.cz/vyhody-a-nevyhody-hnedeho-uhli/>> [9. 9. 2024].
- **Studium biochemie.cz, fotosyntéza**, KUDCH, PŘF UK v Praze, dostupné online na: <http://www.studiumbiochemie.cz/materialy/zakladni_kapitoly/fotosynteza/video/3_HTML5%20Canvas.mp4> [10. 5. 2024].
- **Technická univerzita Ostrava, Katedra geologického inženýrství**, Pigmenty a barviva, dostupné online na: <<http://geolo->>

gie.vsb.cz/loziska/suroviny/pigmenty_barviva.html> [9. 4. 2024].

- **Understanding evolution**, Stomata indicators of CO₂ and temperature, UC Museum of paleontology, Berkeley university of California, dostupné online na: <<https://evolution.berkeley.edu/teach-resources/stomata-3-of-3-indicators-of-co2-and-temperature/>> [10. 7. 2024].

- **Universitetet i Oslo, Institut for biovitenskap**, Historien om plante fysiologi, dostupné online na: <<https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/h/historien-om-plantefysiologi.html>> [20. 7. 2024].

- **Ústav pro archeologii**, Základy geologie pro archeology, přednáška, dostupné online na: <<https://upa.ff.cuni.cz/wp-content/uploads/sites/171/2023/02/GeologieFF-3exogenni-sily-C.pdf>> [20. 5. 2024].

- **U. S. Global change research program**, Fourth National Climate Assessment. Volume II: Impacts, Risks, and Adaptations in the United States, Washington DC: U. S. Government Publishing Office 2018, dostupné online na: <<https://www.globalchange.gov/our-work/fourth-national-climate-assessment>> [18. 5. 2024].

- **Wikipedia, die freie Enzyklopädie**, heslo Nicolas Théodore de Saussure, dostupné online na: <https://de.wikipedia.org/wiki/Nicolas_Th%C3%A9odore_de_Saussure> [28. 6. 2024].

- **Wikipedia, free encyclopedia**, heslo Neolithic, dostupné online na: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic>> [10. 5. 2024].

- **Wikipedia, free encyclopedia**, heslo Artificial photosynthesis, dostupné online na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_photosynthesis> [10. 5. 2024].

- **Wikipédia, l'encyclopédielibre**, heslo Jean Senebier, dostupné online na: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Jean_Senebier> [28. 7. 2024].

- **Wikipedie, Otevřená encyklopedie**, heslo Johan Baptista van Helmont, dostupné online na: <https://de.wikipedia.org/wiki/Johan_Baptista_van_Helmont> [10. 5. 2024].

- **Wikipedie, Otevřená encyklopedie**, heslo Jan Ingenhousz, dostupné online na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Jan_Ingenhousz> [10. 5. 2024].

- **Wikipedie, Otevřená encyklopedie**, heslo Robert Mayer, dostupné online na: <https://de.wikipedia.org/wiki/Robert_Mayer> [10. 5. 2024].

10. KATALOGOVÁ ČÁST



Záhonový pluh, tzv. pražský

(materiál: hřídel dřevěný, krojidlo železné, radlice železná; původ: získáno koupí od České národopisné společnosti; datace: konec 19. století; rozměry: 200 x 62 x 90 cm; inv. č. 316; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)



Paraphyllanthoxylon, krytosemenný strom

(materiál: torzo zkamenělého kmene; původ: Jihočeská pánev (klikovské souvrství); datace: stáří cca 100–66 milionů let (pozdní křída); rozměry: 130 x 70 x 40 cm; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)



Vertikální řez vrstvami rašeliniště

(materiál: rašelina v závěsné vitríně; rozměry: 122 x 23 x 11 cm; inv. č. 6034; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)



Lepidodendron sp.

(materiál: slín s otiskem spodní (dekortikované) části kůry plavuňovité rostliny;
původ: Vnitrosudetská pánev, Svatoňovice; datace:
stáří cca 307 milionů let (karbon); rozměry: 33 x 12 cm; inv. č. 69287;
uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)



Lepidodendron aculeatum

(materiál: otisk kůry plavuňovité rostliny; původ: kladenské souvrství; datace:
stáří cca 307 milionů let (karbon); rozměry: 19 x 13 cm; inv. č. 68454;
uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)



Dendrologický herbář

(materiál: herbář upravený jako knihy jednotlivých dřevin s listy, dřevem, plodem, květem, kořínkem, průřezem větévky, semen, semenáčkem a popisem; původ: Česko, Zlatá Koruna; rozměry: 19 x 13 x 5 cm; inv. č. 65297; uložení: Sběrka Národního zemědělského muzea)

Dendrologický herbář

(materiál: herbář upravený jako knihy jednotlivých dřevin s listy, dřevem, plodem, květem, kořínkem, průřezem větévky, semen, semenáčkem a popisem; původ: Česko, Zlatá Koruna; rozměry: 19 x 13 x 5 cm; inv. č. 65247, 65265, 65245; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)



***Herbář Plantae turfosae. Domini Wittingau, Bohemia,
leg. Dr. Breitenlohner***

(materiál: herbář; původ: vazba A. Klein, Vídeň; datace: 1861;

rozměry: 44,5 x 31 x 8 cm; inv. č. 65536;

uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)





Bříza zakrslá (Betula nana)

(materiál: vzorek rostliny v plexibloku;

původ: Česko; datace: 20. století;

rozměry: 14 x 8,5 x 3,5 cm;

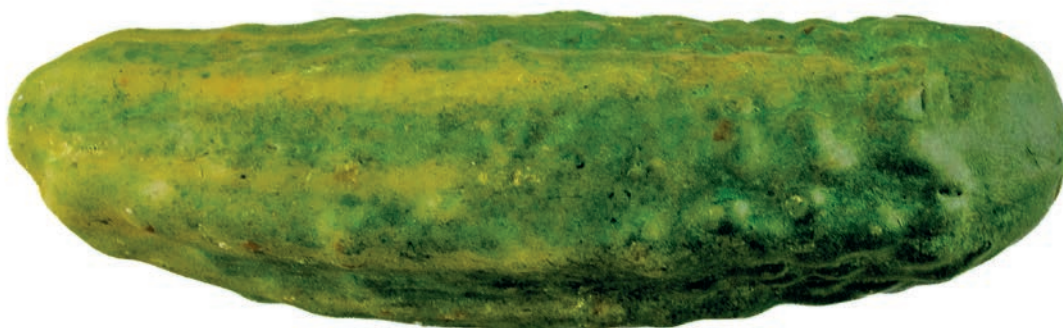
inv. č. 125247;

uložení: Sbírka Národního
zemědělského muzea)



Paprika Carmen

(materiál: parafinový model; původ: vyrobeno v režii Národního zemědělského muzea; datace: 1971; rozměry: 10 x 5 cm; inv. č. 55434; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)



Okurka Mělnická nakládačka

(materiál: parafinový model; původ: vyrobeno v režii Národního zemědělského muzea; datace: 1969; rozměry: 12 x 4 cm; inv. č. 46961; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)

Petržel Stupická

(materiál: parafinový model; původ: vyrobeno v režii Národního zemědělského muzea; datace: 1969; rozměry: 18 x 3 cm; inv. č. 46978; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)



Vzorek vápence ►

(původ: ze staré školní sbírky; rozměry: 10 x 15 cm; uložení: Sběrka Národního zemědělského muzea)



Meruňka Velkopavlovická

(materiál: parafinový model; původ: vyrobeno v režii Národního zemědělského muzea; datace: 1999; rozměry: 5 x 4 cm; inv. č. 59402; uložení: Sběrka Národního zemědělského muzea)



Třešň Napoleonova

(materiál: parafinový model; původ: vyrobeno v režii Národního zemědělského muzea; datace: 1976; rozměry: 2,3 x 2,4 cm; inv. č. 57383; uložení: Sběrka Národního zemědělského muzea)



Jablko Golden Delicious

(materiál: parafinový model; původ: vyrobeno v režii Národního zemědělského muzea; datace: 1970; rozměry: 8 x 8,5 cm; inv. č. 55032; uložení: Sběrka Národního zemědělského muzea)





◄ **Slivoň Agenská**

(materiál: semena ve skleněné vzorkovnici; původ: Výzkumná stanice ovocnářská v Průhonicích; datace: 50. léta 20. století; rozměry: 15 x 6,5 cm; inv. č. 21321; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)

◀ **Kopr**

(materiál: semena ve skleněné vzorkovnici; původ: vyrobeno v režii Národního zemědělského muzea; datace: 2. pol. 20 století; rozměry: 12 x 5 cm; inv. č. 38374; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea)

Pelůška jarní, odrůda Arvika

(materiál: vzorky rostliny a semen v dřevěné prosklené kazetě; původ: SŠ Chlumec nad Cidlinou; datace: 1973; 38 x 27 cm; inv. č. 48934; uložení: Sbírka Národního zemědělského muzea) ▼



OBSAH

1. ÚVOD	6
1.1 Úvodní slovo generálního ředitele	6
1.2 Proč se zabývat fenoménem fotosyntézy	6
1.3 Stav řešení problematiky – fotosyntéza jako námět výstavy	7
1.4 Stručné představení souboru výstav na téma Fotosyntéza v Národním zemědělském muzeu	12
1.4.1 Charakteristika výstavy Fotosyntéza v NZM Praha	12
2. METODIKA	13
3. SEZNAMTE SE, FOTOSYNTÉZA	14
3.1 Co je to fotosyntéza?	14
3.1.1 Fotosyntéza jako biochemický děj	14
3.1.2 Fotosyntéza a světlo	16
3.1.3 Fotosyntetické pigmenty	18
3.1.4 Fotosyntetické organely	20
3.2 Kde se vzala fotosyntéza?	21
3.2.1 Kdy vznikla fotosyntéza a kdo ji vynalezl	21
3.2.2 Endosymbióza a původ chloroplastů	24
3.3 Zelená planeta – rostliny dobývají souš	24
4. FOTOSYNTÉZA UTVÁŘÍ NÁŠ SVĚT	28
4.1 Fotosyntéza a atmosféra	28
4.1.1 Rostliny neposkytují jen kyslík na dýchání	28
4.1.2 Vázání oxidu uhličitého a koloběh uhlíku	31
4.2 Fotosyntéza staví a boří	34
4.2.1 Fotosyntéza staví – biogenní horniny	34
4.2.2 Fotosyntéza boří – eroze a vznik půd	37
4.2.3 Jak by vypadal svět bez fotosyntézy	38
5. FOTOSYNTÉZA VE SLUŽBÁCH ČLOVĚKA	40
5.1 Malá galerie objevitelů fotosyntézy	40
5.2 Fotosyntéza základ zemědělství	43
5.2.1 Vznik zemědělství a domestikace plodin	46
5.2.2 Zemědělství a klimatické změny	47
5.2.3 Moderní pěstební metody – smart agriculture	50

5.3 Fotosyntéza jako energie budoucnosti	54
5.3.1 Výzkum umělé fotosyntézy	54
5.3.2 Fotobioreaktory pro kultivaci mikrořas	55
6. FOTOSYNTÉZA MNOHA TVÁŘÍ	58
6.1 Chytré rostliny aneb umění adaptace	58
6.2 Nefotosyntetizující rostliny	60
6.3 Fotosyntéza v říši zvířat	62
6.4 Botanické sbírky a výzkum klimatu	63
7. ZÁVĚR	65
8. SUMMARY	66
9. LITERATURA	66
10. KATALOGOVÁ ČÁST	76

FOTOSYNTÉZA

KRITICKÝ KATALOG VÝSTAVY

Autoři: Ing. Markéta Ballová, Mgr. Marta Krusberská, Mgr. Jan Prchal, Mgr. Dominika Švédová, Mgr. Marie Voldřichová

Recenzenti: doc. Mgr. Ing. Tomáš Kopta, Ph.D., Ústav zelinářství a květinářství, Zahradnická fakulta Mendelovy univerzity v Brně, Ing. Jakub Pečenka, Ph.D., Mendeleum – ústav genetiky, Zahradnická fakulta Mendelovy univerzity v Brně

Grafický design: Bohumír Golda, Martin Chocholatý, Šimon Dub

Ilustrace: Mariana Jirátová, Mgr. Marie Voldřichová

Technická redakce: Bc. Veronika Pecová, DiS.

Jazyková redakce: Mgr. Jana Válková

Překlad: Mgr. Marie Voldřichová

Tisk: RAIN tiskárna s.r.o.

Fotografie: Národní zemědělské muzeum, České vysoké učení technické v Praze, MSc. Alexey Bondar, Ing. Jana Čechová, Ing. Miroslav Čeněk, Ing. Jana Melcrová, Ph.D., Mgr. Šárka Podlahová, Ph.D., Bc. Natálie Samcová, Mgr. Hana Sehadová, Ph.D., prof. RNDr. Ivo Šauman, RNDr. Petr Rajlich, CSc., Mgr. Dalibor Velebil, Ph.D., Mgr. Marie Voldřichová, doc. RNDr. Petr Znachor, Ph.D., fotobanka VisualHunt – Evropská kosmická agentura, Antoine Hubert, James St. John

Autoři fotografií na obálce a předsádce: Mgr. Hana Sehadová, Ph.D., Bc. Natálie Samcová a Mgr. Šárka Podlahová, Ph.D., autor ilustrace na obálce: Mariana Jirátová

Vydalo: Národní zemědělské muzeum, s. p. o., Kostelní 44, 170 00 Praha 7. Zřizovatelem muzea je Ministerstvo zemědělství.

Rok vydání: 2024, vydání první

Výsledek vznikl za podpory Ministerstva zemědělství, institucionální podpora MZE-RO0824.

Výstava Fotosyntéza byla podpořena dotací Ministerstva kultury ČR z programu Podpora expozičních a výstavních projektů, tematický okruh 1: Instalace expozic nebo výstav, č. j. MK 16656/2024 POD.

Výstava probíhá pod záštitou ministra zemědělství Marka Výborného, ministra kultury Martina Baxy, ministra životního prostředí Petra Hladíka a předsedkyně AV ČR Evy Zažímalové.

Realizace výstavy vznikla v odborné spolupráci se Zahradnickou fakultou Mendelovy univerzity v Brně.

Národní zemědělské muzeum © 2024

Návrh obálky, grafická úprava: Bohumír Golda, Martin Chocholatý, Šimon Dub © 2024

Růžolíčí Chrochtík s.r.o. © 2024

ISBN 978-80-88270-45-4



Mediální partneři:



