

**Univerzita Karlova v Praze**

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální biologie rostlin



Diplomová práce

**Matematické modely vlivu vybraných faktorů na  
rychlost fotosyntézy pro střední odborné školy  
a gymnázia**

Renata Cinibulková

Praha 2010

Školitel: **Doc. RNDr. Jana Albrechtová, Ph.D.**

*Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Jana Albrechtová, Ph.D.*

*Konzultanti diplomové práce: Doc. RNDr. Věra Čížková, CSc., Prof. RNDr. Lubomír Nátr, DrSc., RNDr. Stanislav Zelenda, Mgr. Zuzana Lhotáková, Ph.D.*

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím citované literatury pod vedením doc. RNDr. Jany Albrechtové, Ph.D a že nebyla předložena jako diplomová práce na žádné jiné škole.

V Praze, 2010

Renata Cinibulková

## PODĚKOVÁNÍ:

Ráda bych na tomto místě poděkovala své školitelce doc. RNDr. Janě Albrechtové, Ph.D za vedení během vypracovávání diplomové práce, za vytvoření materiálního zázemí pro mou činnost, za poskytnutí řady podnětů pro zlepšení nejen výukových materiálů a za neustávající entuziasmus v průběhu našich setkání. Mé dík a obdiv patří Prof. RNDr. Lubomíru Nátrovi, DrSc. za skromnost, nesmírně taktí a analytický přístup při konzultacích a za čas věnovaný korekci faktické stránky výukových materiálů. Dále bych chtěla poděkovat doc. RNDr. Věře Čížkové za podporu, vlídný a přátelský přístup během konzultací, kterým vytvořila příjemné a otevřené prostředí pro diskusi, za dohled na didaktickou stránku výukových materiálů a vyhotovení dotazníků. Ráda bych též poděkovala RNDr. Stanislavu Zelendovi za zasvěcení do práce se softwarem Stella, za uvedení do problematiky matematického modelování a také za přínosné připomínky k výukovým materiálům, Mgr. Zuzaně Lhotákové, Ph.D. za podporu a spolupráci během pořádání semináře i v jeho průběhu a také za cenné připomínky během finalizace diplomové práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat doc. RNDr. Fatimě Cvrčkové, Dr.rer.nat. za vtipné a trefné připomínky k pracovním listům, Mgr. Drahomíře Bartákové za zhotovení obrazové části pracovních listů. Chtěla bych poděkovat Mgr. Báře Semerákové ze sdružení TEREZA, která zprostředkovala ověřování výukových materiálů na pilotních školách GLOBE a poskytla řadu podnětů pro lepší využitelnost materiálů ve výuce. Samozřejmě bych též chtěla poděkovat Ing. Martině Ledvinkové a Mgr. Ivaně Sýkorové, které na svých školách testování zajistily. Všem bych chtěla nesmírně poděkovat za čas, kterého je zejména v dnešní uspěchané době nedostatek, a dále za trpělivost, se kterou se opakovaně vraceli k materiálům a pomohli tak zvýšit jejich využitelnost ve výuce. Na závěr bych chtěla poděkovat své rodině a nejbližším přátelům za morální podporu a materiální zázemí.

Finanční zajištění práce: Projekt National Science Foundation, USA, #0627916, „Exploring Ecosystems and the Atmosphere in the K-12 Classroom: A Plan to Integrate NASA Karbon Cycle Science with GLOBE, hlavní řešitel Dr. Scott Ollinger, University of New Hampshire, Durham, USA, spoluřešitel v ČR doc. Jana Albrechtová.

## **Obsah**

Seznam použitých zkratké.....	- 1 -
Abstrakt.....	- 3 -
Abstract.....	- 5 -
Úvod.....	- 7 -
Cíle diplomové práce.....	- 9 -
1. Literární přehled.....	- 10 -
1.1. Fotosyntéza.....	- 10 -
1.2. Rostliny C3 a C4.....	- 10 -
1.3. Oxid uhličitý – vliv na rychlost fotosyntézy.....	- 13 -
1.3.1. Difúze.....	- 13 -
1.3.2. Kompenzační ozáření.....	- 15 -
1.3.3. Kompenzační a saturační koncentrace oxidu uhličitého.....	- 16 -
1.4. Ozáření – vliv na rychlost fotosyntézy.....	- 17 -
1.4.1. Ozáření a morfologie listu.....	- 19 -
1.4.2. Poškození vysokou intenzitou ozáření.....	- 24 -
1.4.3. Kvantový výtěžek fotosyntézy.....	- 25 -
1.4.4. Závislost rychlosti fotosyntézy na ozáření.....	- 26 -
1.5. Dusík – vliv na rychlost fotosyntézy.....	- 27 -
1.5.1. Asimilace dusíku.....	- 27 -
1.5.2. Závislost rychlosti fotosyntézy na dusíku.....	- 28 -
1.6. Teplota – vliv na rychlost fotosyntézy.....	- 28 -
1.6.1. Závislost rychlosti fotosyntézy na teplotě při změně ozáření.....	- 29 -
1.6.2. Vliv dalších faktorů na rychlost fotosyntézy.....	- 30 -
2. Matematické modelování a modely ve výuce.....	- 31 -
2.1. Historie modelování.....	- 31 -
2.2. Modely – klasifikace a využití ve výuce.....	- 32 -
2.2.1. Klasifikace modelů ve výuce (Vachek 1980).....	- 32 -
2.2.2. Klasifikace ve vědě.....	- 35 -
2.2.3. Potíže při začleňování modelů do výuky.....	- 37 -
2.3. Matematické modelování ve výuce.....	- 37 -
2.3.1. Vzdělávací zájem o matematické modelování a aplikace matematiky.....	- 37 -
2.3.2. Význam matematického modelování ve výuce.....	- 40 -
2.3.3. Zařazení modelování do výuky matematiky.....	- 41 -
2.3.4. Zařazení do výuky ostatních předmětů.....	- 43 -

2.3.5.	Výuka založená na počítačích – Stella software .....	- 44 -
2.4.	Systémová teorie, systémová dynamika a systémové myšlení .....	- 47 -
2.4.1.	Filozofické pozadí softwaru Stella .....	- 47 -
2.4.2.	Systémové myšlení a program GLOBE .....	- 49 -
3.	Materiál a metodika .....	- 51 -
3.1.	Použité softwary .....	- 51 -
3.2.	Tvorba modelů .....	- 52 -
3.3.	Tvorba pracovních listů a metodických manuálů .....	- 52 -
3.4.	Podpůrné materiály .....	- 53 -
3.5.	Ověřování materiálů .....	- 53 -
4.	Výsledky .....	- 54 -
4.1.	Modely .....	- 54 -
4.1.1.	Model Vyvětrej si! .....	- 54 -
4.1.2.	Model fotosyntézy – oxid uhličitý a ozáření .....	- 59 -
4.1.3.	Model fotosyntézy – dusík .....	- 62 -
4.2.	Pracovní listy a metodické manuály .....	- 64 -
4.3.	Podpůrné materiály .....	- 66 -
4.3.1.	Cvičení k prezentaci do úvodu modelování .....	- 66 -
4.3.2.	Ppm konvertor .....	- 66 -
4.3.3.	Program na výpočet kvantového výtěžku .....	- 67 -
4.4.	Prezentace a ověření modelů a výukových materiálů .....	- 69 -
4.4.1.	Prezentace na seminářích GLOBE .....	- 69 -
4.4.2.	Dotazníkové šetření .....	- 69 -
5.	Diskuze .....	- 73 -
5.1.	Biologii rostlin .....	- 73 -
5.2.	Matematické modelování a modely ve výuce .....	- 73 -
5.3.	Diskuse použitých softwarových prostředí pro modelování a zásad modelování ve výuce .....	- 77 -
5.4.	Závěrečné zamyšlení .....	- 82 -
6.	Závěry .....	- 84 -
7.	Seznam použité literatury .....	- 86 -
8.	Webové stránky .....	- 94 -
9.	Příloha .....	- 95 -
9.1.	Pracovní listy pro studenty .....	- 95 -
9.1.1.	Pracovní list 01 – Ppm .....	- 95 -

9.1.2.	Pracovní list 02 – Vyvětrej si .....	- 100 -
9.1.3.	Pracovní list 03 – Cesta do hlubin.....	- 106 -
9.1.4.	Pracovní list 04 – Ozářenost a oxid uhličitý .....	- 111 -
9.2.	Metodické manuály pro učitele .....	- 119 -
9.2.1.	Metodický manuál 01 – Ppm .....	- 119 -
9.2.2.	Metodický manuál 02 – Vyvětrej si .....	- 121 -
9.2.3.	Metodický manuál 03 – Cesta do hlubin.....	- 129 -
9.2.4.	Metodický manuál 04 – Oxid uhličitý a ozářenost .....	- 138 -
9.3.	Cvičení k prezentaci do úvodu modelování .....	- 148 -
9.3.1.	Základy modelování – Gramatická pravidla .....	- 148 -
9.3.2.	Základy modelování – Obecné modely.....	- 152 -
9.4.	Řešení cvičení k prezentaci .....	- 156 -
9.4.1.	Základy modelování – Gramatická pravidla .....	- 156 -
9.4.2.	Základy modelování – Obecné modely.....	- 159 -
9.5.	Dotazník .....	- 166 -

## **Seznam použitých zkratk**

<b>01 P(C,I)</b>	Model vlivu koncentrace oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy
<b>01 P(N, C, I)</b>	Model vlivu obsahu dusíku v listech, koncentrace oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy
<b>ATP</b>	Adenosine-triphosphate – adenosin-trifosfát
<b>CAM</b>	Crassulacean Acid Metabolism – metabolismus kyselin tučnolistých rostlin
<b>cytf</b>	Cytochrom f
<b>GLOBE</b>	Global Learning and Observation to Benefit Environment – celosvětový program ekologického vzdělávání, <a href="http://globe.gov/">http://globe.gov/</a>
<b>GST</b>	General Systems Theory – obecná systémová teorie
<b>GUI</b>	Graphical user interface – grafické uživatelské rozhraní
<b>HSPAES</b>	Hawaiian Sugar Planters Association Experiment Station – experimentální stanice havajské asociace pěstitelů cukrové třtiny
<b>ICME</b>	International Congress on Mathematical Education – mezinárodní shromáždění matematického vzdělání
<b>ICMI</b>	The International Commission on Mathematical Instruction – mezinárodní výbor pro výuku matematiky
<b>ICTMA</b>	The International Conferences on the Teaching of Mathematical Modelling and Applications – mezinárodní konference o vyučování matematického modelování a matematické aplikace
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment – integrované vývojové prostředí
<b>LMA</b>	Leaf Mass per Unit Leaf Area – hmotnost na jednotku plochy
<b>MIT</b>	Massachusetts Institute of Technology – ústav techniky v Massachusett
<b>MM</b>	Matematické modelování
<b>NADP</b>	Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate – nikotinamid-adenin-dinukleotidfosfát
<b>OECD</b>	Organization for Economic Co-operation and Development – organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj
<b>PEP</b>	Phosphoenolpyruvate – Fosfoenolpyruvát
<b>PGA</b>	Phosphoglycerate – Fosfoglycerát
<b>PISA</b>	Programme for International Student Assessment – program pro mezinárodní hodnocení studentů
<b>PřF UK</b>	Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze
<b>Rubisco</b>	Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase oxygenase – ribulóza-1,5-bisfosfátkarboxyláza/oxygenáza
<b>RuBP</b>	Ribulose-1,5-bisphosphate – ribulóza-1,5-bisfosfát
<b>SM</b>	Systémové myšlení

**STELLA** Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation –  
vzdělávací experimentální laboratoř s animací pro rozvoj strukturálního  
myšlení

**TEREZA** Sdružení pro ekologickou výchovu, [www.terezanet.cz](http://www.terezanet.cz)



## **Abstrakt**

Cílem diplomové práce bylo vytvořit výukové materiály pro osvojení základů matematického modelování na příkladu procesu fotosyntézy a jejího ovlivnění různými faktory. Mezi výukové materiály patří modely vlivu vybraných faktorů prostředí na rychlost fotosyntézy, pracovní listy a metodické manuály sloužící jako podklad pro práci s modely a další podpůrné výukové materiály pro střední školy. Tyto výukové materiály mají současně studentům přiblížit základy modelování a jeho význam nejen ve vědě, ale také ve výuce. Tato diplomová práce vznikla na základě zapojení týmu z Katedry experimentální biologie rostlin PřF UK do mezinárodního projektu NSF v rámci programu GLOBE – Koloběh uhlíku<sup>1</sup>.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část zahrnuje literární přehled a úvod do matematického modelování (v softwaru Stella), které jsou zpracované s ohledem na výukové účely a slouží jako podklad pro praktickou část diplomové práce. Zároveň je teoretická část určena učitelům středních škol a případně studentům jako faktografický přehled. V závěru oddílu zabývajícího se modelováním a modely jsou zařazeny kapitoly pojednávající o počátcích vzrůstu zájmu využití modelování ve výuce a filozofickém pozadí softwaru Stella<sup>2</sup> a programu GLOBE<sup>3</sup> (zkratka „Global Learning and Observation to Benefit the Environment“), v rámci kterého je diplomová práce vypracována. V první kapitole praktické části diplomové práce jsou popsány programy, které byly k vytvoření modelů použity. Další kapitola je věnována představení vytvořených modelů. Třetí kapitola uvádí výsledky získané z vyhodnocení dotazníkového šetření na pilotních školách účastnících se testování vytvořených materiálů – modelů, pracovních listů, metodických materiálů a dalších podpůrných materiálů. Závěrečná část obsahuje diskusi a závěr. Pro vytvoření modelů vlivu vybraných faktorů na rychlost fotosyntézy bylo třeba představit biologický obsah, jež

---

<sup>1</sup> <http://globecarboncycle.unh.edu/> a <http://kfrserver.natur.cuni.cz/globe/>

<sup>2</sup> <http://www.iseesystems.com/community/downloads/NetsimModels.aspx#3>

<sup>3</sup> <http://globe.gov/>

přesahuje hranice kurikula<sup>4</sup> a vzdělávací cíle středních škol. Jako modelovací prostředí byl zvolen software Stella, jež podporuje pochopení složitých dynamických systémů. Je vhodný zejména pro studenty s ne zcela kvalitním matematickým základem. Podporuje různé učební styly, a tak umožňuje vyhovět potřebám jednotlivých studentů. Bylo dále třeba připravit materiály, které studenty seznámí se základy práce v softwaru Stella a hlavními myšlenkami systémového myšlení a systémové dynamiky (viz kapitola 2.4), jež jsou filozofickým pozadím softwaru Stella.

Modely a podpůrné materiály byly představeny a předány pilotním školám na semináři GLOBE konaných na Katedře experimentální biologie rostlin, dne 4 – 5.4. 2008 a 11.-12.6. 2010. Ověřování materiálů proběhlo na dvou středních pilotních školách ve spolupráci se sdružením TEREZA. Na základě zpětné vazby získané prostřednictvím dotazníkového šetření byly navrženy úpravy materiálů tak, aby se zvýšila jejich využitelnost ve výuce.

**Klíčová slova:** fotosyntéza, modely, matematické modelování, systémové myšlení, systémová dynamika, environmentální faktory, výuka biologie rostlin, růst rostlin, biomasa rostlin, rostliny.

---

<sup>4</sup> **Kurikulum** vyjadřuje pohyb určitým směrem, po určité cestě k určitému cíli. Kurikulum může být chápáno jako (a) vzdělávací program, (b) obsahová náplň výchovně-vzdělávacího působení (vše, co bývá zahrnuto v osnovách a metodických příručkách) nebo (c) dosažený výsledek (získané kompetence).

## **Abstract**

The goal of this Master thesis was development of teaching materials that are focusing on mastering the fundamentals of mathematical modelling on the examples of photosynthetic processes and influence of selected environmental factors on these processes. Developed models of photosynthetic response to select environmental factors, worksheets, methodical manuals and other supporting materials belong to the teaching materials for secondary schools and serve as a basis of work with models. This teaching materials are aimed to introduce modelling and its significance not only in science but also in education. The present thesis was accomplished on the basis of participation of the Department of Experimental Plant Biology of Faculty of Science of Charles University in Prague in international project NSF within programme GLOBE – The Carbon Cycle.

The present thesis is divided into two parts – theoretical part and practical part. The theoretical part includes a literary review and an introduction to the mathematical modelling (in software Stella) that are elaborated considering the teaching purposes and serve as a theoretical background for practical part of present thesis. The chapters that deal with increasing interest in mplementing of modelling in education and with philosophical background of software Stella and of programme GLOBE (abbreviation for „Global Learning and Observation to Benefit the Environment“) are placed at the end of section about modelling and models.

The programmes used for model building are described in the first chapter of practical part of diploma thesis. The next chapter is dedicated to presentation of newly developed models that were built. The following chapter includes findings obtained from evaluation of questionnaire research in pilot schools that participated in testing of teaching materials – models, worksheets, methodical manuals and another supporting materials. The final part contains discussion and conclusion.

In order to build the models of photosynthetic response to elected environmental factors it was necessary to introduce several topics of plant biology that are beyond the curricular borders and the teaching goals of secondary school. The Stella software was chosen as an modelling environment. This software support better understanding of complex dynamic systems and it is convenient especially for the students with limited mathematical skills. The Stella software supports various learning styles and therefore enables satisfactory approaches to wide range of individuals. Further, it was necessary to create materials that prepare eachers

and students for fundamental work in software Stella and that introduce the main ideas of „Systems Thinking“ and „Systems Dynamics (see chapter 2.4). Systems Thinking and Systems Dynamic are the philosophical background of the software Stella.

The models and supporting materials were presented and passed to pilote schools in workshop GLOBE. The workshops GLOBE were held on 4. – 5.4. 2008 and 11.-12.6.2010. The verification of the teaching materials was run in two pilote secondary schools in cooperation with association TEREZA. In order to increase utility of teaching materials in classwork there were suggested alternations of the these materials on the basis of feedback which was obtained by questionnaire research.

## Úvod

Exploze technologických pokroků, rychlý rozvoj oborů a vznik oborů nových klade stále větší požadavky na studenty, kteří musí být schopni reagovat na proměnlivost prostředí více než kdy předtím. Ve víru změn současné doby vzniká potřeba reorganizace školního systému, potřeba změny vzdělávacích cílů a strategií jejich dosažení. Vyrůstá nutnost přechodu od encyklopedičnosti a poznatkové roztříštěnosti k syntéze poznatků z různých oborů a schopnosti tyto poznatky uplatnit v praxi. Myšlení, které stojí v pozadí změn, však často zůstává nezměněno. Úsilí změnit strategie ve vzdělávacím systému zůstává ochromeno, neboť nové strategie a struktury ohrožují tradiční návyky, normy a předpoklady.

V tomto století získal ve světě, v různých oblastech společnosti, zvýšenou pozornost myšlenkový přístup „Systems Thinking“ (systémové myšlení, [www.iseesystems.com](http://www.iseesystems.com)) a to díky svému zaměření na vnímání světa holistickým způsobem namísto jeho rozdělení na mnoho částí, které jsou analyzovány do detailu a většinou izolovaně od ostatních částí. Systémové myšlení se též prosazuje ve vzdělávání, kde spojuje jednotlivé obory a činí matematiku přirozenou součástí každého oboru. Aby studenti mohli čelit stále komplexnějším situacím, je třeba u nich rozvíjet kompetence komunikativní, kompetence k řešení problémů a ke tvorbě rozhodnutí.

Nástrojem pro budování těchto kompetencí a syntézu vědomostí z různých oborů je „System Dynamics Modelling“ (systémově dynamické modelování) – metoda využívající matematických modelů a simulací pro prohloubení pochopení složitých dynamických systémů, jako jsou např. přírodní prostředí nebo sociální dynamika (Forrester 1994). Jedno z modelovacích prostředí pro simulace je software Stella, jež je vhodný pro tvorbu jednodušších modelů. Přes 10 let je v USA systémově dynamické modelování užíváno učiteli na základních i středních školách. Zatímco Stella je software hojně užíván v USA, v České republice se k podobným účelům, zejména ve fyzice, využívá software Coach 6. Stella nicméně oproti Coach 6 nabízí snadnou možnost měnit hodnoty parametrů a je vhodným nástrojem pro studenty, kteří nemají tolik pevné základy v matematice. Je též atraktivním nástrojem pro studenty reluctantní plně se podílet na výukové aktivitě.

Tato diplomová práce byla vypracována na základě zapojení týmu z Katedry experimentální biologie rostlin PŘF UK do mezinárodního projektu GLOBE – Koloběh uhlíku, projekt National Science Foundation, USA, #0627916, „Exploring Ecosystems and the Atmosphere in the K-12 Classroom: A Plan to Integrate NASA Karbon Cycle Science with GLOBE,

hlavní řešitel Dr. Scott Ollinger, University of New Hampshire, Durham, USA, spoluřešitel v ČR doc. Jana Albrechtová. Přístup k pochopení významu uhlíku v klimatickém systému Země je systémový, tj. je nutno jej zkoumat na více vzájemně propojených úrovních. Využití počítačových modelů na různé úrovni komplexnosti posilují nejen systémový přístup, ale také představují studentům důležitý vědecký nástroj nutný pro pochopení klimatických změn a reakce rostlin na ně.

Zájem o proces modelování jako nástroj ve výuce zejména matematiky vzrostl přibližně v 80. letech. Od roku 1990 se pak po celém světě matematické modelování dostává do popředí kurikula matematiky. Na vzrůstu zájmu o matematické modelování a aplikace matematiky ve vzdělávání se podílely materiály vzniklé na podkladě řady mezinárodních zasedání ICME a ICTMA konaných pod záštitou organizace ICMI a dále výsledky studie OECD PISA. Přestože je změna kurikula teprve v počátcích a myšlenky Systémového myšlení se mohou zpočátku zdát cizí až frustrující, je důležité začít a pokračovat.

Cílem této diplomové práce je nejen vytvořit studijní materiály pro střední školy přibližující vliv faktorů prostředí na rychlost fotosyntézy, ale také představit základy a principy modelování a simulace jako výukový nástroj pro dosažení vzdělávacích cílů, ukázat význam matematiky v každodenním životě a význam modelování jako styčné plochy pro mezioborovou spolupráci.

## **Cíle diplomové práce**

- Vytvoření modelů vlivu vybraných faktorů na rychlost fotosyntézy v softwaru Stella
- Vytvoření pracovních listů a metodických manuálů jako podkladových materiálů pro práci s modely
- Vytvoření dalších podpůrných materiálů zvyšujících efektivitu využití předchozích materiálů ve výuce
- Prezentace vytvořených modelů a výukových materiálů pro pilotní školy programu GLOBE
- Ověření modelů a výukových materiálů na pilotních školách a dopracování materiálů na základě zpětné vazby získané formou dotazníkového šetření
- Vypracování literárního úvodu, který bude tvořit učitelům teoretický podklad pro práci s modely

## 1. Literární přehled

### 1.1. Fotosyntéza

Fotosyntéza je proces, při kterém dochází k přeměně energie slunečního záření v energii chemických vazeb organických molekul. Tento proces se sestává z mnoha chemických reakcí. U zelených rostlin fotosyntéza vyžaduje kromě světla, jako zdroje energie, také vodu jako donor elektronů a atmosférický oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) jako přímý substrát. Sacharidy produkované fotosyntézou slouží jako potrava živým organismům, vč. člověka a slouží dále jako prekurzory pro syntézu dalších organických látek.

V primární fázi fotosyntézy dochází k využití energie fotonu k produkci excitovaných elektronů, jež mohou být využity v redukčních reakcích v kontrolovaném biochemickém procesu. Energie fotonu je zachycena pigmenty světlosběrného systému a přeměněna v reakčním centru fotosystémů na energii ve formě elektronů s vysokým redoxním potenciálem. Tyto elektrony jsou v elektrotransportním řetězci přenášeny přes tylakoidní membránu chloroplastů za vzniku protonového gradientu, jež poskytuje energii pro syntézu adenosin trifosfátu (ATP), který hraje centrální roli v energetickém metabolismu všech biologických systémů. Mnoho metabolických procesů, jako např. asimilace  $\text{CO}_2$ , syntéza proteinů nebo iontové pumpy vyžadují ATP.

Veškerá suchá biomasa produkovaná fotosyntetickými organismy pochází z využití reductantů (ferredoxin a NADPH) a ATP, vytvořených ve světelné fázi fotosyntézy, pro syntézu chemických produktů z jednoduchých organických látek, zejména  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{SO}_4^{2-}$  (Lawlor 2001, Bacon Ké 2001).

Pokud nejsou uvedeny zdrojové citace, poznatky o fotosyntézy byly čerpány z vysokoškolských učebnic, především: - Pavlová (2002. Fyziologie rostlin. Karolinum, 248. ISBN 80-246-0985-1), a Procházka a kol. (2003. Fyziologie rostlin. Academia Praha, 484. ISBN 80-200-0586-2), především z kapitoly profesora Nátra – Nátr (1998) a dále jeho knihy Nátr, L., 2006. Země jako skleník, Proč se bát  $\text{CO}_2$ ?. Academia Praha, 142. ISBN 80-200-1362-8)

### 1.2. Rostliny C3 a C4

Vyšší terestrické rostliny jsou rozděleny do tří hlavních kategorií podle cesty asimilace oxidu uhličitého na rostliny C3, C4 a CAM. U mnoha rostlin mírného pásu a zemědělských plodin jako jsou brambory, pšenice nebo rajčata je prvním stabilním produktem v cyklu fixace oxidu



uhličitého je 3-fosfoglycerát, molekula s třemi atomy uhlíku. Proto se rostliny s tímto typem fixace CO<sub>2</sub> nazývají **rostliny C3**. U řady rostlin, mezi které patří např. kukuřice, cukrová třtina nebo maniok, je však primárním akceptorem CO<sub>2</sub> fosfoenolpyruvát (PEP) a vzniká čtyřuhlíkatý oxalacetát. Proto se tyto rostliny nazývají **rostliny C4**. Oxalacetát je následně redukován na malát, který je transportován do jiných buněk, kde je dekarboxylován. Rostliny C4 dominují na teplých a otevřených stanovištích. **Rostliny CAM** (Crassulacean Acid Metabolism) v noci fixují CO<sub>2</sub> podobným způsobem jako rostliny C4. Uchovávají malát ve vakuolách a ve dne, kdy je dostatek světla a tedy i ATP a NADPH, realizují Calvinův cyklus. Je tedy u nich časově oddělena fixace CO<sub>2</sub> od jeho využití. Tyto rostliny, mezi které patří kaktusy, sukulenty nebo např. ananas, jsou adaptovány na horké a suché podnebí tím, že během dne mohou mít uzavřené průduchy, a brání se tak vysychání (Nátr1998).

### **Objevení C4-fotosyntézy**

C4 fotosyntéza byla objevena v roce 1966 (Hatch, Slack 1966). Samotnému objevení C4 cesty předcházela řada pozorování anatomických a fyziologických odlišností, které však ještě nebyly vodítkem k odhalení C4 procesů (Hatch 1999). Pozorována byla speciální Kranz-anatomie listů (viz dále) (Haberland 1884). Rhoades a Carvalho (1944) studovali za různých podmínek pod světelným mikroskopem listy kukuřice. Výsledkem práce bylo zjištění, že chloroplasty buňky pochev cévních svazků slouží ke krátkodobému uchování sacharidů, jež vznikly fotosyntetickou aktivitou mezofylových buněk. Rozvoj mikroskopie dále umožnil objev dimorfie chloroplastů kukuřice. Kdy chloroplasty buněk cévních svazků obsahují hojně škrobová zrna, ale neobsahují téměř žádná grana, zatímco chloroplasty mezofylových buněk obsahují četná grana.

Cesta k odhalení C4 fotosyntézy začala roku 1954 krátkou zmínkou v roční zprávě Hawaiian Sugar Planters Association Experiment Station (HSPAES) založená na značení <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>, která poukázala na skutečnost, že u cukrové třtiny fosfoglycerát (PGA) není hlavním nosič nově fixovaného uhlíku. Cukrová třtina vzbudila svůj zájem díky vysoké efektivitě v produkci sacharidů a autoři tak považovali za zajímavé srovnat její fotosyntetický cyklus s ostatními rostlinami. Další roční zprávy HSPAES (1956 – 1960) identifikovaly malát a aspartát jako hlavní primární produkty, jež byly označeny <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>, což bylo potvrzeno i prací Karpilova (1960). Hatch a Slack začali v roce 1960 pracovat na metabolismu sacharidů cukrové třtiny, přičemž byli v pravidelném kontaktu s hawaiskými pracovníky, kteří používali radioaktivní značení. Své výsledky publikovali až v roce 1965 v detailní a přístupné formě. Závěrem práce bylo konstatování, že asimilace uhlíku u cukrové třtiny probíhá podstatně odlišným způsobem

než u mnoho dalších rostlin a prvním stabilním produktem fotosyntézy jsou malát a aspartát (Kortschak et al. 1965).

Hatch a Slack (1966) publikovali výsledky o rok později a shledali podobnost nejen s výsledky hawaiských pracovníků, ale také prací Karpilova z roku 1960. Z těchto prací byl vytvořen jednoduše pracující model fotosyntetické asimilace uhlíku u cukrové třtiny. V roce 1967 byli publikovány další práce zabývající se asimilací CO<sub>2</sub> u různých druhů rostlin (*Atriplex spongiosa*, *Cyperus*). Tento proces asimilace, jež byl shledán podstatně odlišným od asimilace uhlíku dosud známých rostlin, byl nazván „C4 dicarboxylic acid pathway of photosynthesis“ a zkrácen na **C4 fotosyntéza**. Od roku 1970 je pojem C4 fotosyntéza, stejně jako termíny C3 fotosyntéza, C3 a Rostliny C4, široce používán. (Hatch 1999). Výhoda C4 fotosyntézy oproti C3 fotosyntéze se ukázala být maximální za podmínek vysoké osvětlenosti, vysoké teploty a omezené dostupnosti vody (Black 1973). Což jsou podmínky, jež existují na mnoha pouštích, pastvinách a dalších subtropických oblastech světa. Proto nepřekvapí, že se Rostliny C4 rozšířily v těchto podmínkách.

### **Objev Kranz anatomie listu**

Haberlandt užil termínu **Kranz**, aby odkázal na věnečkovité radiální uspořádání mezofylových buněk, které obklopovaly pochvy cévních svazků (Haberlandt 1882). Kranz anatomie C4 fotosyntézy je spojena s dvěma druhy jednoděložných rodin (*Poaceae* a *Cyperaceae*) a 16 dvouděložných rodin – mezi těmito rodinami existuje určitá variabilita Kranz anatomie. Předpokládá se, že C4 fotosyntéza se vyvinula u všech těchto rodin nezávisle (Ehleringer, 1993).

Buňky pochev cévních svazků jsou ve srovnání s C3 analogy velké a mají velké, četné chloroplasty, vytvářejí škrob a mají asymetrické uspořádání cytoplasmatických složek. Probíhá zde fotosyntetická redukce uhlíku a hlavní funkcí jejich struktury je zachování vyšší koncentrace oxidu uhličitého (Dengler, 1999). Buněčná stěna je chemicky modifikována ukládáním suberinu, což zabraňuje difúzi CO<sub>2</sub> z buněk pochev zpět do mezibuněčného prostoru (Leatsch, 1971) a dále je minimalizována difúze snížením mezibuněčného prostoru uvnitř mezofylu (Byot, 1976). Mezofylové buňky jsou C3 analogům podobné, ale jsou zvětšené v radiálním směru a uspořádané tak, aby v každé buňce byla kontakt s buňkami pochev cévních svazků. V mezofylových buňkách probíhá primární asimilace uhlíku (Dengler, 1999).

### 1.3. Oxid uhličitý – vliv na rychlost fotosyntézy

Jedním z nejdůležitějších faktorů prostředí, které ovlivňují rychlost fotosyntézy, je koncentrace oxidu uhličitého – nezbytného substrátu fotosyntézy. Za přirozených podmínek je CO<sub>2</sub> limitujícím faktorem fotosyntézy u většiny rostlin. Fotosyntetická asimilace CO<sub>2</sub> a jeho přeměna na sacharidy se uskutečňuje v pletivech obsahujících chloroplasty, zejména v listovém pletivu mezofylu, ale též fotosyntetizují některé zelené stonky rostlin, stejně jako nezralé plody.

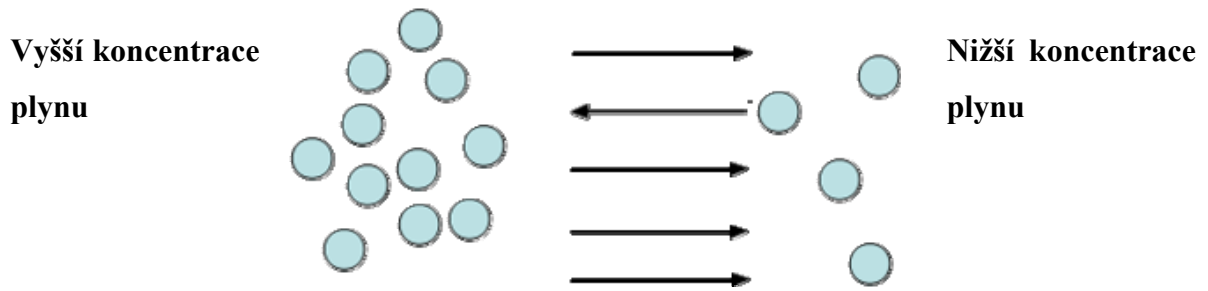
Primární fixaci CO<sub>2</sub> (karboxylaci) v mezofylových buňkách u rostlin C<sub>3</sub> zajišťuje enzym **Rubisco**<sup>5</sup> (ribulóza-1,5-bisfosfátkarboxyláza), zatímco rostliny C<sub>4</sub> fixují CO<sub>2</sub> enzymem **PEP-karboxylázou**.

#### 1.3.1. Difúze

Rychlost fotosyntetické asimilace je závislá na koncentraci substrátu (CO<sub>2</sub>) ve vnitřním prostředí listu. Koncentrace CO<sub>2</sub> uvnitř listových pletiv je dána rychlostí difúze CO<sub>2</sub> z vnější atmosféry do mezibuněčných prostor listu. CO<sub>2</sub> vstupuje z atmosféry do listů průduchy po koncentračním spádu, který je dán rozdílem koncentrací v okolí a uvnitř listu. Spontánní pohyb částic v prostoru po koncentračním spádu (z oblasti o vyšší koncentraci látky do místa o nižší koncentraci látky) se nazývá **difúze** – viz Obr. 1. Difúze probíhá v tekuté i plynné fázi obklopující rostlinu. Čím je gradient koncentrace strmější, tím je tok CO<sub>2</sub> do listu větší. Koncentrační gradient je vytvářen spotřebou CO<sub>2</sub> v procesu fotosyntézy. Běžná atmosférická koncentrace CO<sub>2</sub> je přibližně 386 ppm, zatímco uvnitř listu je to přibližně 70% této koncentrace (u rostlin C<sub>4</sub> je koncentrace uvnitř listu ještě nižší). Rozdíl okolní koncentrace CO<sub>2</sub> a koncentrace CO<sub>2</sub> uvnitř listu má u rostlin C<sub>3</sub> vliv na účinnost fotosyntézy, neboť Rubisco má k CO<sub>2</sub> nízkou afinitu, tj. sílu vazby (Nátr 1998, Chrispeels 2003, Robert 2006).

---

<sup>5</sup> Rubisco je enzym přítomný ve stromatu chloroplastu rostlin C<sub>3</sub>, který katalyzuje první krok řady reakcí Calvinova cyklu, kde je CO<sub>2</sub> vázán na RuBP (ribulóza-1,5-bisfosfát) za vzniku labilního šesti-uhlíkatého produktu. Rubisco se též nachází u rostlin C<sub>4</sub>, kde se účastní reakcí v C<sub>3</sub> cyklu.



Obr. 1 Difúze plynu z místa o vyšší koncentraci látky do místa o nižší koncentraci. Kruhy odpovídají molekulám plynu. Šipky směru difuze.

Difúzi plynu ve vzduchu popisuje Fickův zákon, kde **difúzní koeficient** [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ] je množství látky, které za definovaných podmínek tlaku a teploty, difunduje průřezem plochy při koncentraci gradientu  $\text{g} \cdot \text{m}^{-4}$ . Difúzní koeficient charakterizuje jak látku, tak prostředí, v němž difúze probíhá.

#### Fickův zákon

$$F = -D \cdot d\rho \cdot dz^{-1}, \text{ kde}$$

$F$  je rychlost difúze, [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $d\rho \cdot dz^{-1}$  je koncentrační gradient, [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-4}$ ],  $D$  je difúzní koeficient závislý na teplotě a tlaku, [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Konvenčně se značí tok z oblasti o vyšší do nižší koncentraci látky znaménkem minus. Při  $T = 20^\circ\text{C}$  a tlaku 1 atm je  $D_{\text{CO}_2} = 1.57 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Pro případ difúze  $\text{CO}_2$  ve vzduchu popisuje vztah závislosti hodnoty difúzního koeficientu na tlaku a teplotě následující rovnice

$$D(T, p) = 1.57 \cdot 10^{-5} \cdot 101,3 \cdot p^{-1} \cdot T \cdot 293,16^{-1}$$

#### Odpor a vodivost

Na Fickův zákon můžeme nahlížet jako speciální případ obecného fyzikálního vztahu, který popisuje závislost rychlosti difúze na celkovém odporu  $R$  [ $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ] vůči difundující látce a gradientu nebo rozdílu koncentrace. Označíme-li  $dz/D = R$ , pak  $D/dz$  je  $1/R$  neboli **vodivost** [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Vodivost tak můžeme chápat jako rychlost, kterou se molekuly  $\text{CO}_2$  přemístí z okolí do místa karboxylace v chloroplastu přes řadu „překážek“ neboli odporů na cestě. Výměnu plynů mezi organismem a prostředím tak můžeme vhodně popsat následovně

$$F = g \cdot (C_a - C_i), \text{ kde}$$

$F$  je rychlost difúze [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $g$  vodivost látky [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $C_a$  koncentrace v okolí [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $C_i$  koncentrace uvnitř listu ve stejných jednotkách.<sup>6</sup>

Hlavními odpory proti difúzi  $\text{CO}_2$  z okolní atmosféry do listu jsou odpor hraniční vrstvy (tenká vrstva [mm] téměř nehybného vzduchu těsně při povrchu listu), odpor kutikuly, stomatální odpor (odpor průduchů) a odpor mezofylu. Přitom největší a nejvíce proměnný odpor představují průduchy. Po vstupu do mezofylové buňky se  $\text{CO}_2$  rozpustí ve vodném roztoku. Zatímco v plynné fázi mají na velikost odporu vliv převážně okolní podmínky (vlhkost, rychlost větru, ozáření, fenotyp rostliny a forma listu), v tekuté fázi velikost odporu ovlivňují zejména vnitřní faktory (stáří listu, vnitřní anatomie listu a účinnost fotosyntetických procesů) (Nátr 1998, Cambell 1998, Robert 2006).

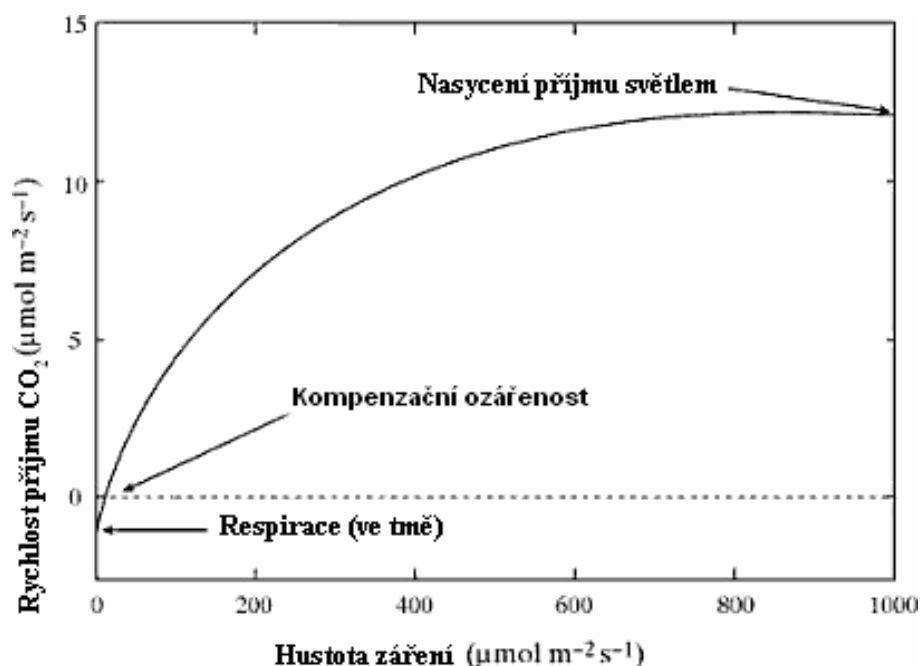
### 1.3.2. Kompenzační ozáření

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje rychlost fotosyntézy je ozáření, protože sluneční záření je nepostradatelným zdrojem energie. Hodnota ozáření, při které se množství asimilovaného  $\text{CO}_2$  rovná množství uvolněného  $\text{CO}_2$  dýcháním, se nazývá **kompenzační ozáření**. Je-li ozáření rovna této hodnotě, výměna  $\text{CO}_2$  mezi okolím a listem ustává. Při zvýšení ozáření nad tuto hodnotu převažuje asimilace nad uvolňováním  $\text{CO}_2$  a  $\text{CO}_2$  může difundovat do listu – viz Obr. 2. Při okolní koncentraci  $\text{CO}_2$  360 ppm (při teplotě  $20^\circ\text{C}$ ) se kompenzační ozáření u mnoha rostlin pohybuje v rozmezí  $8 - 15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . U rostlin adaptovaných na vysokou ozáření je to  $10 - 20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , zatímco u rostlin ze zastíněných oblastí je to pouze  $1 - 5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . (Narishima 1997, Nobel 2009).

---

<sup>6</sup> Násobením molárním objemem vzduchu (na úrovni moře při teplotě  $20^\circ\text{C}$  je to 41,4) dostaneme jednotky

$$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 41.4 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}] = [\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}].$$



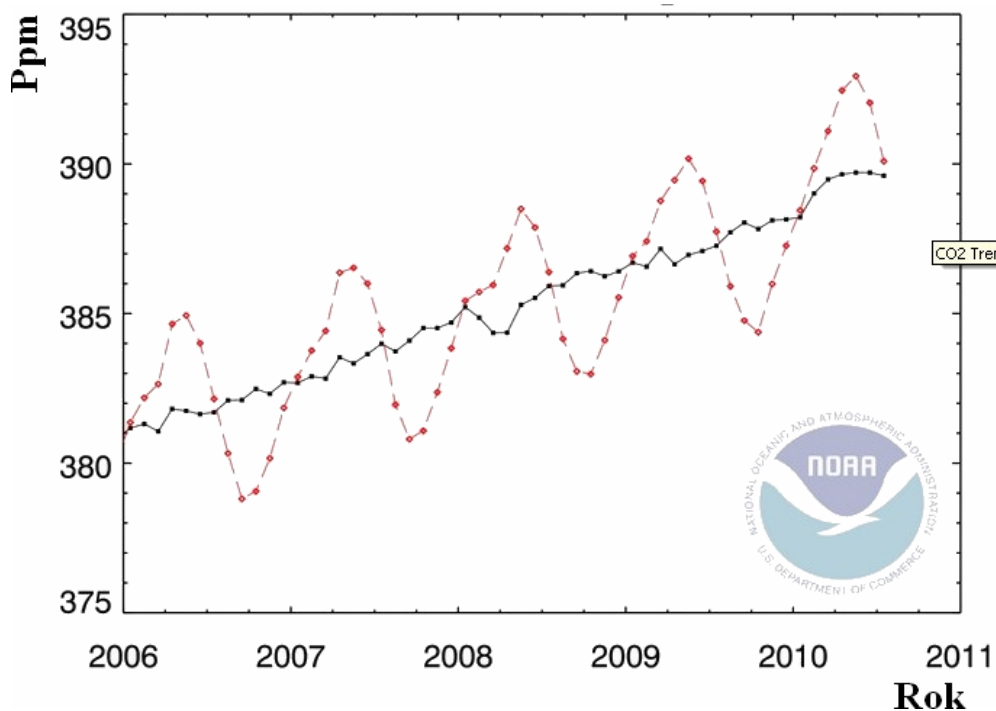
Obr. 2 Idealizovaná křivka popisující vztah rychlosti příjmu CO<sub>2</sub> na hustotě ozáření dopadající na svrchní stranu listu u Rostlin C<sub>3</sub> (Nobel 2009, upraveno).

### 1.3.3. Kompenzační a saturační koncentrace oxidu uhličitého

Koncentraci CO<sub>2</sub>, při které ustává výměna CO<sub>2</sub> mezi listem a vzduchem, který jej obklopuje, nazýváme **CO<sub>2</sub> - kompenzační koncentrací**. Její hodnota závisí na intenzitě fotorespirace a typu karboxylace. U Rostlin C<sub>3</sub> se při teplotě 25 °C pohybuje v rozmezí 40 – 60 ppm, což je mnohem vyšší hodnota než u Rostlin C<sub>4</sub>, kde bývá pod 10 ppm (Metzler 2001). Koncentrace CO<sub>2</sub> se zvyšuje se zvyšující se teplotou a se snižující se ozářeností. (Nobel 2009).

**Saturační koncentrací** CO<sub>2</sub> rozumíme takovou koncentrací, při které je nasyčena fotosyntéza substrátem a při dalším zvyšování koncentrace CO<sub>2</sub> již nedochází ke zvýšení rychlosti fotosyntézy. Při současné atmosférické koncentraci CO<sub>2</sub> (390 ppm – viz Obr. 3)<sup>7</sup> není dodávka atmosférického CO<sub>2</sub> dostatečná, aby bylo saturace dosaženo. Proto je CO<sub>2</sub> -deficit běžným limitujícím faktorem fotosyntézy. Se zvyšující se koncentrací CO<sub>2</sub> roste rychlost fotosyntézy strměji u Rostlin C<sub>4</sub> oproti Rostliny C<sub>3</sub>, jež saturace dosahují při 1000 ppm, zatímco Rostliny C<sub>4</sub> při 200 – 300 ppm. (Larcher 2003)

<sup>7</sup> Manua Loa CO<sub>2</sub>, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo>



Obr. 3 Trendy koncentrace atmosférického oxidu uhličitého. Červená křivka s kosočtverci reprezentuje hlavní měsíční hodnoty, ([www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo), upraveno)

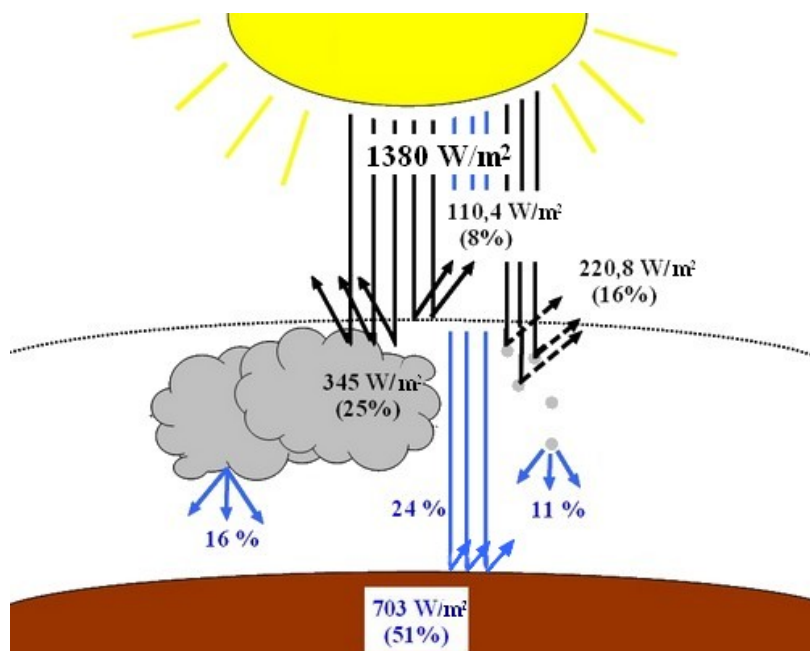
**Karboxylační koeficient** představuje počáteční sklon saturační křivky popisující závislosti rychlosti fotosyntézy na koncentraci oxidu uhličitého. Tento koeficient byl vztažen k aktivitě RuBP karboxylázy (Hemsley 2004).

#### 1.4. Ozáření – vliv na rychlost fotosyntézy

Oxid uhličitý představuje nezbytný substrát procesu fotosyntézy a energie záření umožňuje jeho zabudování do organických sloučenin. **Záření** je šíření energie prostorem. Základní jednotkou záření je foton. Kvantem rozumíme světelnou energii nesenou jedním fotonem. Přitom energie kvanta záření je závislá na vlnové délce a udává se v jednotkách joule (J). Hustota toku fotonů se nazývá **zářivý tok**, měří se ve formě elektromagnetického záření a udává se ve wattch ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2} = \text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Elektromagnetické záření, které je vnímatelné lidským okem se nazývá **světlo**. Jde o oblast v rozsahu vlnových délek 380 – 780 nm. Oblast elektromagnetického záření, v níž je rozložena absorpce asimilačních pigmentů a která vyvolává v rostlinné buňce proces fotosyntézy, se nazývá **fotosynteticky aktivní radiaci** (FAR). Jde o oblast elektromagnetického záření v rozsahu vlnových délek 400 – 700 nm (Nátr 1998, Muneer et al. 2004).

Během dne se dostává k povrchu atmosféry, na plochu kolmou ke směru dopadajících paprsků, sluneční záření o **průměrné hustotě**  $1380 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Z toho se přibližně 8%

od atmosféry odrazí, dalších 25% se odrazí od mraků a 16% je absorbováno atmosférou a přeměněno v teplo. Na povrch Země tak dopadá průměrně 51% z původních  $1380 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Přitom 27% tvoří difúzní záření, které vzniká rozptylem přímého záření na oblacích a nečistotách v atmosféře a odrazem od terénu – viz Obr. 4. Součet přímého a difúzního záření se označuje jako **záření globální**. Aktuální hodnota hustoty záření závisí na oblačnosti a čistotě ovzduší. Na povrch vegetace dopadá při jasné obloze průměrně  $500 - 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , při zatažené obloze  $50 - 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . **Ozářenost** (záření dopadající na jednotku plochy libovolně orientované ke směru záření) pak dále závisí na úhlu dopadu slunečních paprsků, tj. na zeměpisné šířce, ročním obdobím a denní době. (Slavíková 1986, Mohr 1995).



**Obr. 4 Slunečního záření dopadající na povrch Země (hodnoty převzaty – Slavíková 1986)**

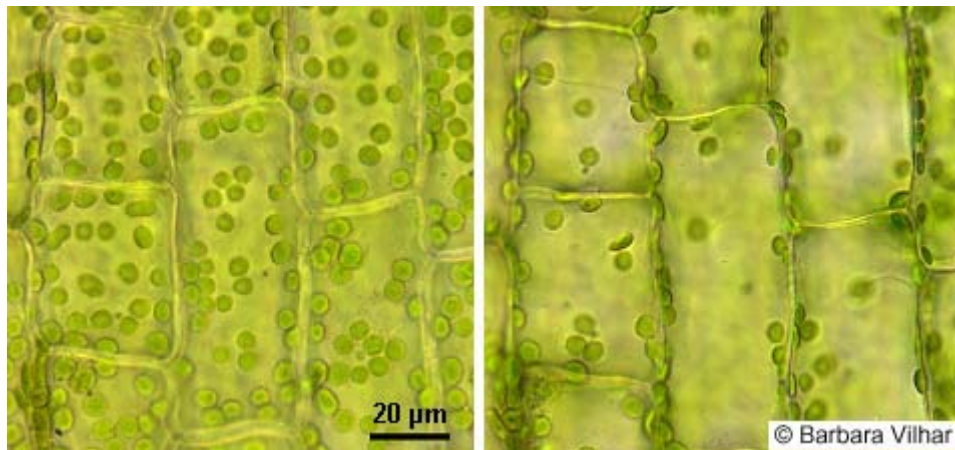
Rostliny jsou schopné fotosyntetizovat v určitém optimu ozáření, které se liší mezi rostlinnými druhy. V rámci jednoho druhu se mohou rostliny adaptovat na prostředí s vysokou nebo nízkou ozářeností např. polohou nebo anatomií listu. Rostlina reaguje na aktuální změnu světelných podmínek také počtem, rozmístěním chloroplastů a uspořádáním fotosyntetického aparátu (Larcher 2003).

Vysoká intenzita ozáření podporuje transpiraci, což má nepříznivý účinek na fotosyntézu. Rostliny mohou při vysoké ozáření zvýšit účinnost fotosyntézy zmírněním gradientu ozáření nebo při nízké ozáření zvýšením množství zachyceného záření na několika úrovních: (a) orientací listů hranou/kolmo ke směru záření, (b) změnou morfologie listu, (c)



aklimace chloroplastů na místní světelné podmínky, (d) aklimatizací fotosyntetického aparátu na místní světelné podmínky (Mohr 1995)

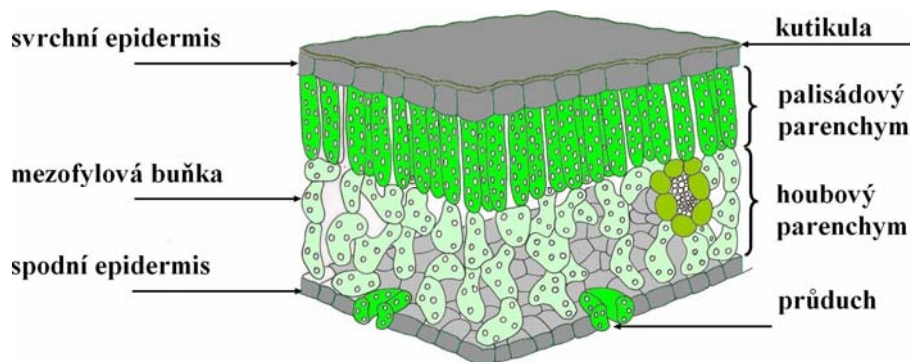
Extrémně intenzivní viditelné záření nebo UV záření (200 – 400 nm) má fotodestrukční účinky na strukturu proteinů a dalších organických molekul. Poškození se týká zejména fotooxidace chloroplastových pigmentů, destrukci nukleových kyselin a bílkovin a poškození protoplazmy (Larcher 2003). Obranou před nadměrným osvětlením je fototaxe (chloroplasty se přemísťují do místa buňky s nižší dostupnou ozářeností – viz Obr. 5) nebo povrchy s vysokou odrazivostí (vosky, chlupy na listech). Mechanismus, který pomáhá odvádět nadbytek energie, je **glykolátový metabolismus**, při němž se v buňce váže kyslík a odvádí se energie. Proces probíhající na světle, při kterém je přijímán kyslík a produkován oxid uhličitý v důsledku syntézy glykolátu v chloroplastech a následně glykolátového a glycinového metabolismu v peroxizomech a mitochondriích, se nazývá **fotospirace** (Nobel 2009).



**Obr. 5** Pohyb chloroplastů do místa buňky s nižší dostupností ozářenosti. Vpravo list *Elodea* vystavený vysoké ozářenosti s chloroplasty přemístěnými do nástěnné cytoplazmy u buněčných stěn orientovaných rovnoběžně s dopadajícím zářením, (<http://botanika.biologija.org>, upraveno)

#### 1.4.1. Ozářenost a morfologie listu

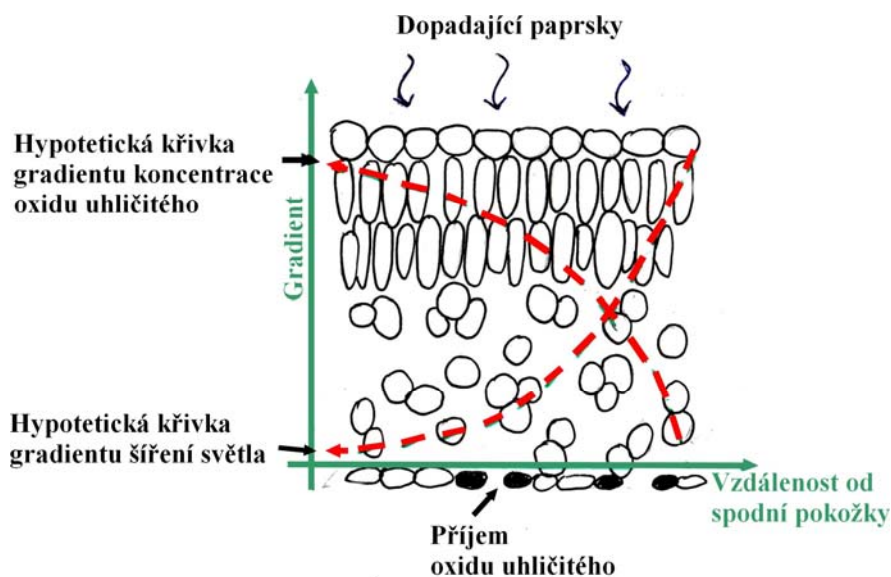
Důležitým fotosyntetickým orgánem rostlin je list. Anatomická struktura listu může být různá. Na povrchu má vždy pokožku a obsahuje mezofyl – fotosyntetické pletivo. Nejčastějším typem listu dle vnitřní struktury je list dorziventrální, typický pro většinu dvouděložných rostlin. U dorziventrálního listu (viz Obr. 6) je na povrchu listu pokožka tvořená plochými buňkami. Svrchní epidermis je krytá kutikulou. Součástí epidermis jsou průduchy, trichomy a papily. Základní pletivo listu je mezofyl, který je u dorziventrálního listu rozčleněn na svrchní palisádový parenchym a dolní houbový parenchym.



**Obr. 6 Anatomická stavba dorziventrálního listu**

Anatomie listu má vliv na účinnost absorpce světla dvojitým způsobem: 1) Světlo absorbují pigmenty, zejména *chlorofyly a* a *b*. Jiné pigmenty, např. antokyany absorpci modifikují. Protože jsou chlorofyly produkovány plastidy a zde jsou také uloženy v membránovém systému organel, může se stát, že kvanta procházející listem minou „cíl“ a nebudou absorbována. 2) Buněčné struktury uvnitř listu, jako jsou buněčné stěny a mezibuněčné prostory, světlo rozptylují a vytvářejí tak více uniformní světelné podmínky vnitřního prostředí (Lee 2000). Listy, vystavené vysoké ozáření, jsou celkově tlustší (tj. mají vyšší hmotnost na jednotku plochy, LMA), opatřeny tlustší kutikulou a buněčnou stěnou. Např. u buku lesního činí tloušťka slunných listů v dospělosti 0.2 mm, zatímco u stinných jen 0.108 mm (Fitter 1981).

V plochém dorziventrálním listu, který je charakteristický pro většinu dvouděložných semenných rostlin, dopadá světlo na svrchní stranu listu. Díky lokaci průduchů většinou na spodní stranu listu, je naopak oxid uhličitý přijímán spodní stranou listu. Hypoteticky by měl být gradient (směr růstu veličiny) světla největší na v oblasti svrchní pokožky, zatímco gradient oxidu uhličitého v oblasti spodní pokožky – viz Obr. 7. Tato situace by však nebyla ideální pro optimální rychlost fotosyntézy. Maximalizace fotosyntézy vyžaduje, aby oxid uhličitý i světlo byly efektivně (rovnoměrně) rozprostřeny uvnitř listu (Smith 1997).



**Obr. 7** Hypotetické křivky gradientu světla (gradientem je míněn růst od hodnot nižších k hodnotám vyšším) a koncentrace oxidu uhličitého v dorziventrálním listu (vytvořeno podle Smith 1997).

### Svrchní pokožka

Epikutikulární vosky a trichomy (chlupy na pokožce) mění odrazivost listu. Stěny epidermálních buněk mohou nabývat různého tvaru podle intenzity záření, kterému jsou vystaveny, a tím ovlivňují zachycení světla. Vypouklý tvar pokožkových buněk pomáhá zvýšit absorpci světla pro větší fotosyntetickou účinnost a je typický pro rostliny v extrémně stinném prostředí – viz Obr. 8.



**Obr. 8** Vypouklý tvar epidermálních buněk extrémně stinných rostlin (převzato z Lee, 1986)

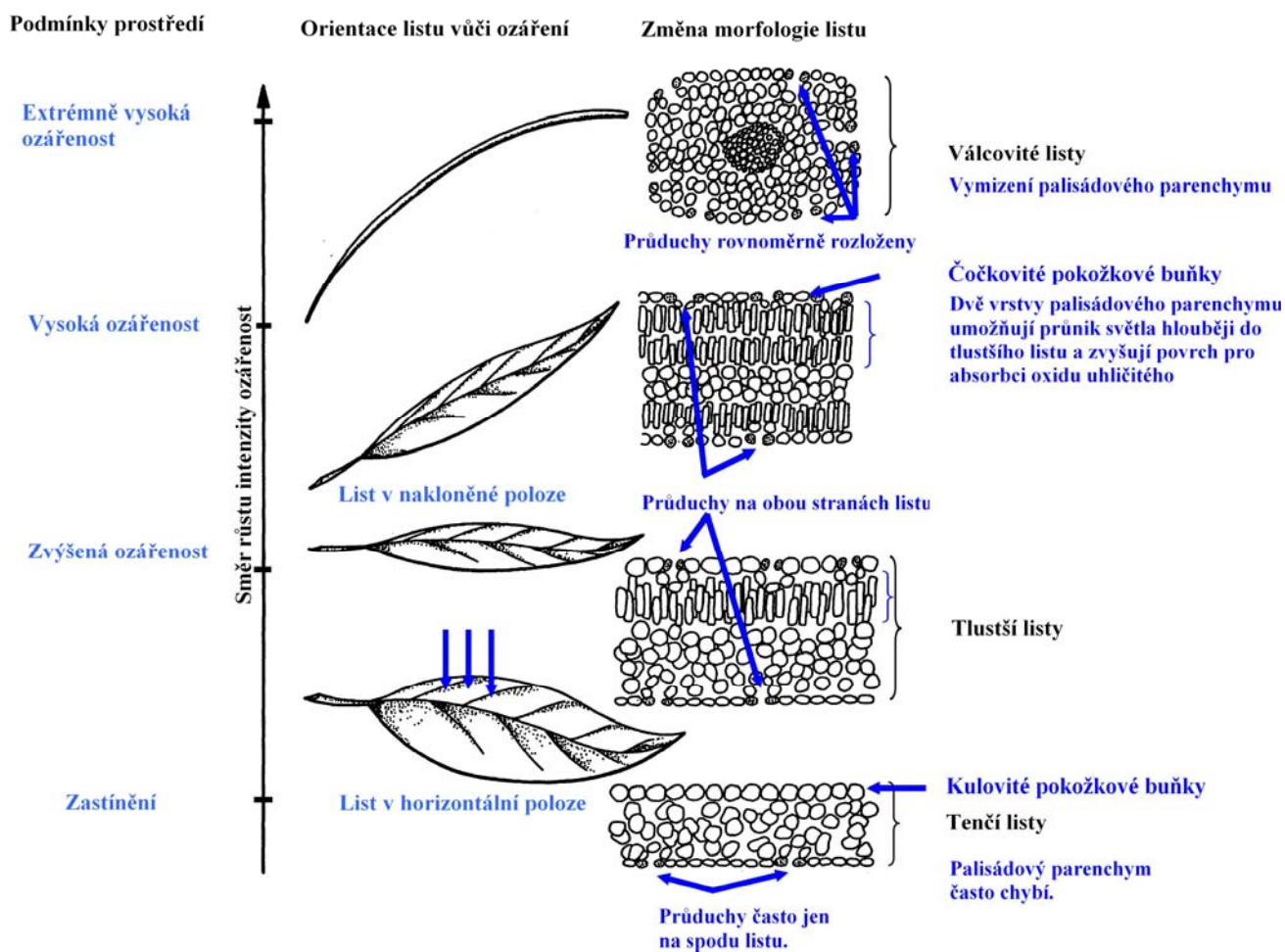
Jsou-li buňky kulovitého tvaru, paprsky rovnoběžně dopadající se lámou a sbíhají se do hlouběji umístěného ohniska, kde může být ozáření až 10-krát větší než v místě dopadu. To poskytuje výhodu při dopadu rovnoběžných paprsků slunečních skvrn v hustém porostu (Vogelmann 1993). Je-li ohnisko mezofylové buňky spíše ve vakuole než v chloroplastu, je fotosyntetický aparát chráněn před fotoinhibicí. Na druhé straně při nízké ozáření může být

ohnisko zaměřené do chloroplastu výhodou (Lee 1986). Navíc se s kulovou plochou zvětšuje plocha pro absorpci difúzního světla.

### Mezofyl

Optické vlastnosti vrstvy buněk regulují vnitřní rozšíření světla. Architektura palisádového parenchymu usnadňuje proniknutí světla do nižších vrstev listu a jeho rovnoměrnější rozšíření uvnitř listu. Buňky palisádového parenchymu jsou v těsném kontaktu se svrchní pokožkou, a tak velká část dopadajícího světla může projít do listu, aniž by záření bylo rozptýleno mezibuněčným vzdušným prostorem. Chloroplasty buněk palisádového parenchymu jsou navíc při vysoké ozáření přisedlé ke stěně buňky, a tak (kromě běžné funkce absorpce FAR) fungují také částečně jako „optický kabel“, který vede světlo. Buňky houbového parenchymu jsou svým tvarem více adaptovány na využití sníženého množství světla, neboť nepravidelný povrch zvyšuje pravděpodobnost, že se odražené světlo dostane do fotosyntetického centra. (Terashima 1995, De Lucia 1996).

Listy, které se vyvinuly za podmínek vysoké ozáření, mají dobře vyvinutý palisádový parenchym o jedné až více vrstvách buněk na svrchní části listu a volněji organizovaný houbový parenchym ve spodní části listu – viz Obr. 9 (Raghavendra 2000). Oproti tomu při nízké ozáření palisádový parenchym nemusí být vytvořen. Aby byla zajištěna přiměřená dodávka oxidu uhličitého ke zvětšené ploše mezofylových buněk u slunných listů, musí být průduchy vytvořené na obou stranách listu. Průduchy na svrchní straně listu mohou být ohroženy fotooxidativním poškozením (obsahují chlorofyl), nicméně obranou proti poškození může být natáčení listů hranou proti působení přímého záření nebo mohou být průduchy chráněny kutikulou.



Obr. 9 Změna morfologie listu se vzrůstající ozářeností (Smith 1997, upraveno)

### Spodní pokožka

Zejména ve stinných lokalitách se utvářejí dvoubarevné povrchy spodní pokožky, kde vnitřní strana je tmavší než vnější. Spodní pokožka tak odráží světlo zpátky do houbového parenchymu, což umožňuje světlo v houbovém parenchymu zachytit a zabránit jeho úniku. (Smith 1981)

### Pohyb a aklimace chloroplastů na zvýšenou ozářenost

Při zvýšené ozářenosti jsou chloroplasty umístěny téměř výlučně podél stěn buněk, což redukuje odpor difúze oxidu uhličitého kapalnou fází z mezibuněčného prostoru do místa primární fixace oxidu uhličitého. Pohyb chloroplastů tak hraje ve fotosyntéze listu podobnou roli jako pohyb listů ve fotosyntéze porostu – tj. chloroplasty mohou reagovat na náhlé změny v ozářenosti orientací hrany k buněčné stěně nebo pohybem k méně ozářené stěně buňky. Chloroplasty se aklimatizují na lokální světelné podmínky snížením počtu tylakoidů v jednom granu a celkový objem stromatu oproti objemu tylakoidů se zvyšuje. Větší počet buněk na příčném řezu slunných listů má za následek vyšší obsah chlorofylu na jednotku plochy oproti

stinným listům. Chloroplasty jsou nicméně menší a obsahují méně chlorofylu než chloroplasty stinných listů (Terashima 1995, Raghavendra 2000). Protože absorpce světla je funkcí obsahu pigmentů, je v důsledku toho absorpce snižena. Více světla je propouštěno a přebytek absorbovaného záření je přeměněn v teplo, což má nepříznivý účinek na vodní rovnováhu (De Lucia 1996).

#### **1.4.2. Poškození vysokou intenzitou ozáření**

Jestliže anténní komplex pigmentů absorbuje více energie, než může být využito v temnostní fázi fotosyntézy, je nadbytečná energie dostupná pro fotochemické reakce, při kterých dochází k vytvoření toxických produktů, jež mohou nespecificky reagovat s organickými molekulami (lipidy, proteiny, nukleové kyseliny a další) většinou za vzniku dvojné vazby, a tak je poškozovat. Uvedený proces se nazývá **photodestrukce**.

##### Vznik radikálů

Příkladem toxického produktu je singletový kyslík ( $^1O_2^*$ ), který vzniká přímým přenosem excitační energie z triplexového stavu chlorofylu na  $O_2$ . Během fotosyntetického elektronového přenosu může dojít k přenosu jednotlivých elektronů na kyslík za vzniku superoxidového radikálu ( $\dot{O}_2^-$ ), který dává po dalším přidání elektronu vzniknout peroxidu vodíku ( $H_2O_2$ ). spojením peroxidu vodíku a superoxidového radikálu vzniká hydroxylový radikál ( $HO\dot{O}$ ).

##### Obrana proti poškození

$\dot{O}_2^-$  může být odstraněn superoxidázovou dismutázou, přítomnou ve stromatu chloroplastů, a membráně tylakoidů. V chloroplastech též existují nespecifické antioxidanty (např. askorbát, tripeptid glutathion nebo  $\alpha$ -tokoferol). Fotodestrukci může být zabráněno rozptýlením 5 – 10% nadbytečné energie fluorescencí chlorofylu. Dále dochází k uvolnění excitované energie přes triplet karotenoidů, jež uvolní přebytečnou energii ve formě tepla. Dalším obranným mechanismem je xantofylový cyklus, ve kterém je violaxantin přeměněn na světle přes antheraxantin na zeaxantin. Při vysokém stresu ozáření nemusí být tyto ochranné mechanismy dostačující a může dojít až k odumření listu (Larcher 2003).

### 1.4.3. Kvantový výtěžek fotosyntézy

**Kvantový výtěžek fotosyntézy**<sup>8</sup> je poměr fotosyntetického produktu, počet molů asimilovaného CO<sub>2</sub> nebo uvolněného O<sub>2</sub>, při využití energie jednoho molu fotonu. Hodnota kvantového výtěžku je ovlivněna počtem kvant, který je nutný pro produkci ATP, redukci NADP a požadavkem metabolických drah na ATP a NADPH při asimilaci CO<sub>2</sub>. Při absenci činnosti Q cyklu, fotorespirace a omezení světlem je potřeba alespoň 9 kvant pro redukci jednoho CO<sub>2</sub>, což dává kvantový výtěžek 0.111 mol(CO<sub>2</sub>) · mol<sup>-1</sup> (foton). Pokud je ovšem Q-cyklus činný, je ATP syntéza účinnější a požadavek na počet kvant se sníží na 8, což dává kvantový výtěžek 0.125 mol(CO<sub>2</sub>) · mol<sup>-1</sup> (foton). Tyto hodnoty předpokládají, že absorbované fotony jsou bezzbytku fotochemicky využity v transportu elektronů přes membránu (což se v realitě nicméně nestává). Měření kvantového výtěžku asimilace CO<sub>2</sub> za normální koncentrace CO<sub>2</sub> (330 ppm) ukázalo, že u mnoha druhů rostlin se hodnoty kvantového výtěžku pohybují v rozmezí 0.093 ± 0.003 mol(CO<sub>2</sub>)·mol<sup>-1</sup>(foton), přičemž při absenci stresu nebyly shledány rozdíly mezi rostlinami ze slunných a stinných lokalit.(Nátr 1998, Raghavendra 2000)

Kvantový výtěžek se tradičně měřil jako počáteční úhel sklonu křivky popisující závislost rychlosti fixace CO<sub>2</sub> na ozáření. Při nízké ozáření je závislost fixace CO<sub>2</sub> na ozáření lineární a křivka v této části je tím strmější (tj. rychlost fotosyntézy tím vyšší), čím je kvantový výtěžek vyšší. Přitom lineární část křivky představuje maximální kvantový výtěžek

---

<sup>8</sup> Kvantový výtěžek se měří v mol(CO<sub>2</sub>)·mol<sup>-1</sup>(foton). Někdy se však kvantový výtěžek uvádí v jednotkách g(CO<sub>2</sub>)·J<sup>-1</sup>(energie) nebo dokonce g(C) · J<sup>-1</sup> (energie). Protože 1 mol CO<sub>2</sub> odpovídá 44.01 g CO<sub>2</sub> a energii 1 molu fotonu můžeme spočítat podle Planckovy rovnice (energie fotonu při dané vlnové délce je rovna součinu Planckovy konstanty [6.626· 10<sup>-34</sup> J·s] a frekvence záření), lze kvantový výtěžek  $\phi$  vyjádřit následovně:

$$\phi = \left[ \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{\text{mol}(\text{foton})} \right] \approx \frac{44.01}{E\lambda} \left[ \frac{\text{g}(\text{CO}_2)}{\text{kJ}(\text{foton})} \right], \text{ kde}$$

$E_\lambda$  je energie molu fotonu v závislosti na vlnové délce a  $n$  je počet kvant nutných pro fixaci molu molekul CO<sub>2</sub>.

fixace CO<sub>2</sub>. **Maximální kvantový výtěžek**<sup>9</sup> představuje poměr energie fixované v molu fotosyntetického produktu (např. glukózy) a minimální energie nutné pro jeho vznik. Při vyšší ozáření nemůže být absorbované světlo využito fotosyntetickým aparátem a jeho nadbytek je tak rozptýlen ve formě tepla, což snižuje hodnotu kvantového výtěžku (Leegood 2000, Caemmerer 2000)

#### 1.4.4. Závislost rychlosti fotosyntézy na ozáření

Závislost čisté fotosyntézy na záření lze vyjádřit saturační křivkou. V roce 1905 Blackman interpretoval tvar saturační křivky návrhem, že fotosyntéza je mechanismus, který se skládá ze dvou dějů: fotochemické (světelné) reakce a ne-fotochemické (temnostní) reakce, která je pomalejší než světelná fáze fotosyntézy. Jsou-li listy vystaveny vysoké ozáření, roste zpočátku příjem oxidu uhličitého přímo úměrně se zvyšující se ozáření a limitujícím faktorem celého procesu fotosyntézy je rychlost světelných reakcí. Křivka v této části je tím strmější (tj. rychlost fotosyntézy tím vyšší), čím je vyšší **kvantový výtěžek**. Od jisté hodnoty ozáření však příjem oxidu uhličitého narůstá jen pozvolna nebo vůbec, neboť je světelná reakce světlem již nasycena a limitujícím faktorem procesu fotosyntézy jsou nadále enzymatické reakce temnostní fáze a dostupnost oxidu uhličitého. Saturace fotosyntézy světlem závisí vedle CO<sub>2</sub> na teplotě (Larcher 2003).

Slunné listy mají vyšší bod nasycení fotosyntézy světlem (200 – 250 W·m<sup>-2</sup>) než stinné listy (100 W·m<sup>-2</sup>). **Fotosystémy** (pigment-proteinové komplexy ukotvené v membráně tylakoidů chloroplastů, které se podílejí na přenosu elektronů) obsahují ve svých reakčních centrech několik specializovaných molekul chlorofylu, které mohou uvolnit elektrony o vysoké energii. Na každou takovou specializovanou molekulu chlorofylu připadá 200 – 300 nespecializovaných molekul chlorofylu světlosběrného komplexu, které se dostávají do

<sup>9</sup> Vezmeme-li například již zmíněnou glukózu, která fixuje v 1 molu energii 2,8·10<sup>6</sup> J, a jež vyžaduje minimální energii 48 molů fotonů (tj. 8 molů fotonu na fixaci každého ze 6 molů uhlíku v 1 molu glukózy {C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>}), můžeme spočítat maximální kvantový výtěžek následovně:

$$\phi_{\max} = \text{energie produktu} / (\text{minimální počet kvant} \cdot E_{\lambda})$$

$$\phi_{\max} = 2,8 \cdot 10^6 \text{ [J]} / (8 \cdot E_{\lambda} \text{ [J]}), \text{ kde } E_{\lambda} \text{ je energie kvanta při dané vlnové délce.}$$



světlem navozeného excitovaného stavu a svou energii předávají specializovaným molekulám chlorofylu. Při nízké ozáření je třeba mnoha molekul chlorofylu, aby byla potřebná energie nashromážděna. Při vysoké ozáření však není dostatek reakčních center, aby mohly zpracovat dostupnou energii. Listy, které se vyvinuly za vysoké ozáření, se adaptovaly tak, že mají méně ne-specializovaných molekul chlorofylu, a tím i vyšší bod saturace fotosyntézy světlem než stinné listy, i když efektivita využití světla je nižší. Rostliny C4 mají mnohem vyšší bod saturace fotosyntézy světlem ( $400 - 600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) než Rostliny C3 ( $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), protože oxid uhličitý, který se uvolní fotorespirací, se znovu asimiluje před tím, než může uniknout (Larcher 2003).

## **1.5. Dusík – vliv na rychlost fotosyntézy**

Fotosyntéza je úzce spjata také s a metabolismem dusíku. Asimilace dusíku je závislá na produktech fotosyntézy. Produkty fotosyntézy, sacharidy, a dále aminokyseliny jsou stavebními kameny pro růst a vývoj rostlin. Mezi dodávkou dusíku a zvyšování biomasy tak existuje úzký vztah. Pokud mají rostliny nedostatek dusíku, přeměňují více sacharidů v zásobní látky jako je škrob a tuk. Při vážném deficitu dusíku jsou rostliny zakrslé a reprodukční a senescenční procesy se započnou dříve než při přiměřené dodávce dusíku. Rostliny se dále přizpůsobily snížené dostupnosti dusíku vytvořením tlustších, dlouho-žijících listů (Larcher 2003, Lambers 2008).

### **1.5.1. Asimilace dusíku**

Rostliny přijímají dusík kořeny ve formě amonného kationtu ( $\text{NH}_4^+$ ) nebo nitrátu ( $\text{NO}_3^-$ ), který je následně redukován a včleněn jako aminoskupina do uhlíkatých sloučenin za vzniku amidů a aminokyselin, jež jsou základním stavebním kamenem proteinů. Asimilace dusíku označuje soubor biochemických reakcí, které zahrnují redukcí nitrátu ( $\text{NO}_3^-$ ) postupně na amonný kationt ( $\text{NH}_4^+$ ), který je zabudován do dusíkatých organických sloučenin jako jsou amidy, aminy a dusíkatých heterocyklických sloučeniny. Prvním krokem asimilace dusíku je redukce nitrátu na nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) za katalýzy enzymu *nitrát reduktáza*, jež je přítomný v cytoplasmě buňky. Nitrit je poté redukován na  $\text{NH}_4^+$  za katalýzy enzymu *nitrit reduktáza*, který je přítomen v chloroplastech. Energie a redukční síla potřebná pro redukci nitritu pochází hlavně z elektrotransportního řetězce světelné fáze fotosyntézy a také z respirace. Hlavním místem asimilace dusíku mnoha druhů rostlin je list. Dostupnost dusíku v půdě tak ovlivní množství přijatého a následně asimilovaného množství dusíku v listu. Asimilace dusíku je stimulována světlem, neboť světlo kontroluje aktivitu enzymu nitrát reduktázy a

přímo nebo nepřímo poskytuje redukční sílu nutnou pro včlenění dusíku do aminokyselin (Foyer 2002, Larcher 2003).

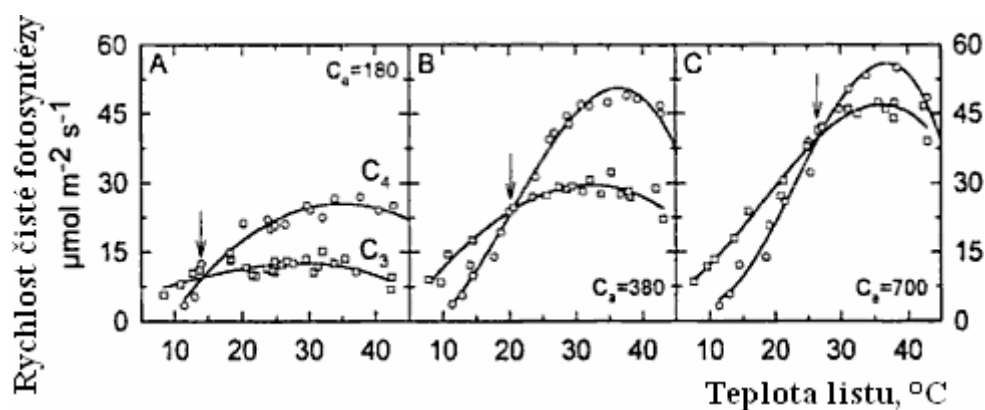
### **1.5.2. Závislost rychlosti fotosyntézy na dusíku**

Obsah dusíku v listu Rostlin C4 je  $0.12 - 0.18 \text{ mol(N)·m}^{-2}$ , zatímco u Rostlin C3 je to  $0.20 - 0.26 \text{ mol(N)·m}^{-2}$  (Sage 1987). Obsah dusíku je zpravidla nižší u stinných listů. Snížený obsah dusíku stinných listů odráží přizpůsobení fotosyntetického aparátu k redukovanému množství dopadajícího světla (Lambers 2008). Rostliny C3 investují 60 – 80 % dusíku v listu do fotosyntetického aparátu (Evans 1989). Z toho významný díl připadá na enzym Rubisco, jež zajišťuje fotosyntetické zabudování  $\text{CO}_2$  do organických sloučenin. Typicky je to 25 – 30% veškerého dusíku slunného listu (Osaki a kol. 1993). U Rostlin C4 je Rubisca 3 – 6krát méně (Evans 1989). Vztah mezi množstvím Rubisca a obsahem dusíku v listech je obvykle lineární s dlišnostmi mezi druhy. Mechanismus, kterým dostupnost dusíku kontroluje hojnost proteinu Rubisco je nicméně z velké části neznámý. Množství Rubisca v listu se pohybuje okolo  $1,32 \text{ g·m}^{-2}$  (Leegood 2000).

Zvýšená dostupnost dusíku v půdě se proto projevuje zvýšením rychlosti fotosyntézy. Rychlost fotosyntézy tak roste lineárně se vzrůstajícím obsahem dusíku v listech až do omezení rychlosti jinými faktory, jež způsobí saturaci (Larcher 2003). Maximální rychlost fotosyntézy přitom roste s obsahem dusíku bez ohledu na to, zda je změna dána obsahem dusíku v listu, ozářeností nebo stářím listu. Maximální rychlost fotosyntézy při saturaci světlem dosahuje  $5.9 - 20.9 \text{ } \mu\text{mol·m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (Ellsworth 2004).

### **1.6. Teplota – vliv na rychlost fotosyntézy**

Rychlost fotosyntézy je ovlivněna vedle koncentrace  $\text{CO}_2$  a ozářenosti také teplotou vzduchu. Teplota nepůsobí přímo na rychlost přenosu  $\text{CO}_2$  z okolí do listu, ale ovlivňuje teplotu listu. Teplota listu následně ovlivňuje rychlost enzymatické fixace oxidu uhličitého ve stromatu chloroplastů, otevřenost svěracích buněk v pokožce listu a rychlost dýchání. Teplotní optimum většiny rostlin C3 je  $15^\circ - 30^\circ\text{C}$ . Mnoho rostlin C4 má vyšší teplotní optimum, tj.  $30 - 47^\circ\text{C}$ . Rostliny CAM mají vysoké teplotní optimum přes den,  $30 - 40^\circ$ , zatímco v noci se přizpůsobily nočním teplotám (Black 1973, Leegood 2000) – viz Obr. 10.



Obr. 10 Teplotní závislost rychlosti čisté fotosyntézy u C3 a C4 rostlin (Leegood 2000, upraveno)

Fotosyntéza rostlin teplého klimatu (subtropy, tropy) se s ochlazením (0 – 12°C) podstatně snižuje. Nízká teplota je tak hlavním faktorem, jenž omezuje produktivitu a geografické rozšíření mnoha druhů rostlin. Rostlinné buňky jsou při nízké teplotě ohroženy tvorbou ledu, jehož krystalky poškozují buněčné struktury. Některé rostliny vyvinuly strategie, které je činí vůči mrazu do určité míry odolnými – jsou to např. zachování vysoké intracelulární koncentrace solutů nebo redukce dostupné vody.

Krátkodobé ochlazení ovlivňuje transport elektronů přes tylakoidní membránu, cyklus redukce uhlíku a zásobení chloroplastu oxidem uhličitým prostřednictvím stomat. Vodivost průduchů pro oxid uhličitý může být zasažena přímo samotnou teplotou nebo může dojít k uzavírání stomat nepřímým působením teploty, kdy svěrací buňky reagují na zvýšenou koncentraci oxidu uhličitého, která je způsobena sníženou aktivitou Rubisca pod vlivem nízké teploty (Allen 2001).

### 1.6.1. Závislost rychlosti fotosyntézy na teplotě při změně ozáření

Při zvýšené ozáření dochází k navýšení obsahu dusíku v listech, ke zvýšení obsahu Rubisca o cytochromu f, aniž by se změnil samotný poměr cytf/Rubisco. Podle modelu fotosyntézy Rostlin C3 (Farquhar 1980) je rychlost asimilace CO<sub>2</sub> omezena buď schopností Rubisca zpracovat substrát RuBP nebo kapacitou reakcí probíhajících na tylakoidní membráně nebo kapacitou Calvinova cyklus regenerovat RuBP. Při optimální teplotě je rychlost asimilace CO<sub>2</sub>, při vysoké ozáření a koncentraci CO<sub>2</sub> 380 ppm, často omezena RuBP karboxylací (Sage, 2007). Při suboptimální teplotě je rychlost asimilace CO<sub>2</sub> při vysoké ozáření obecně omezena RuBP regenerací. Při teplotě nad optimum není mechanismus omezení rychlosti asimilace CO<sub>2</sub> zcela objasněn (Yamori 2010). Mnoho rostlin se adaptovalo aklimatizovalo na prostředí změnou biochemické kompozice (podíl sacharidů, proteinů, tuků, ligninu, celulózy apod.) a morfologie listů a celé rostliny (Terashima et al. 2005).

### 1.6.2. Vliv dalších faktorů na rychlost fotosyntézy

Vedle koncentrace oxidu uhličitého, ozáření a teploty ovlivňuje fotosyntézu také dostupnost vody a minerální výživa. Optimální hydratace je důležitá pro průběh primární fáze fotosyntézy, neboť voda je donorem elektronů pro kyslík uvolňující komplex fotosystému II. Rostliny, které mají nedostatek vody zastavují stomatární transpiraci a transpirují jen kutikulárně. Uzavírání průduchů pak zpomaluje výměnu oxidu uhličitého. Dalším vysycháním se snižuje hydratace protoplazmy, a tím fotosyntetická kapacita. (Pavlová 2005).

Minerální výživa je pro rostliny důležitá, neboť esenciální prvky hrají roli při metabolických procesech a vytváření funkčních struktur. Např. fosfor je součástí sloučenin ATP a má tak význam v reakcích vyžadujících dodání energie. Účinek vápníku na fotosyntézu je zprostředkován vazbou  $\text{Ca}^{2+}$  na polypeptidy, zejména ve fotosystému II. Draslík ovlivňuje syntézu bílkovin, zejména syntézu enzymu Rubisca, a tím ovlivňuje rychlost fotosyntézy. Chlor zabezpečuje rozklad vody ve fotosystému II a podílí se na otevřenosti průduchů, čímž reguluje příjem oxidu uhličitého. Železo má význam při syntéze chlorofylu a tvoří součást hemových skupin cytochromů. Je též součástí feredoxinu. Mangan je nutný při vytváření lamelární struktury tylakoidů a je součástí supramolekulárního komplexu fotosystému II štěpícího vodu ve světelné fázi fotosyntézy. Zinek ovlivňuje aktivitu enzymů glycidového metabolismu, včetně Rubisca. Je též důležitý při syntéze bílkovin a fotosyntetických pigmentů. Měď je složkou plastocyaninu v chloroplastech a ovlivňuje obsah chlorofylu (Pavlová 2005).

Fotosyntéza může být ovlivněna také těžkými kovy. Rtuť a arsen negativně ovlivňují obsah chlorofylu v chloroplastech, čímž dále ovlivňují rychlost fotosyntézy. Rtuť dále poškozuje kořeny, a tak mění příjem živin důležitých pro fotosyntézu (Kovářová 2010).

## 2. Matematické modelování a modely ve výuce

### 2.1. Historie modelování

**Matematické modelování** je proces reprezentace problémů reálného světa v pojmech matematiky za účelem nalezení řešení těchto problémů. Obecně akceptovaný popis procesu matematického modelování začíná u identifikace reálného problému, který je v procesu modelování zidealizován, zjednodušen a přeložen do matematiky. Matematická formulace problému umožňuje nalezení matematického řešení, jež je třeba zpět interpretovat v rámci původního systému. Na závěr je třeba model validovat. Je rozdíl mezi matematickým modelem (produktem) a matematickým modelováním (proces dosahování vhodné reprezentace reálné situace)<sup>10</sup> (Blum 2002).

Slovo **model** vzniklo z latinského slova *modus, modulus*, jež znamenalo míru, vzor nebo způsob. V různých vědních oborech však nabývá pojem model různých významů, např. ve stavebnictví nebo strojírenství se jím rozumí provedení nějakého předmětu, stroje nebo stavby ve zmenšeném měřítku. Ve výtvarném umění představuje pak pojem model vzorovou formu, podle níž se vytváří obraz.

Základy vědeckého modelování položili v **17. století Galileo Galilei** a **Izack Newton** (pojmu model a modelování však nebylo v tomto smyslu užíváno). Byla rozpoznána možnost studovat objekty nepřímou, prostřednictvím jiných objektů, které jsou izomorfní v nějakém přesně definovaném oboru<sup>11</sup>.

Do poloviny 19. století se užívalo modelů zcela intuitivně a často nebylo rozlišováno mezi reálným objektem a modelem. Až v druhé polovině 19. století se užívá pojmu modelu v dnešním významu. V matematice a logice byla snaha o vytvoření obecné teorie modelování, a tím došlo ke zpřesnění pojmu model. Dále se pak teorie modelování uplatňovala v

---

<sup>10</sup>*Reálným světem* rozumíme vše, co se týká přírody, společnosti nebo kultury. Pojem *problém* je používán v širším smyslu – pojem zahrnuje nejen praktické problémy, ale také problémy více intelektuální, jež jsou zaměřené na popis, vysvětlení nebo pochopení světa. *Validizovat* znamená zkontrolovat, zda řešení problému (získaného interpretací matematických výsledků) je vhodné a rozumné pro dané účely.

<sup>11</sup> *Objekty jsou izomorfní*, jestliže mezi objekty existuje určité zobrazení, pomocí kterého můžeme mezi objekty beze ztráty jakékoliv informace libovolně přecházet.

pedagogice, psychologii, sociologii aj. Pojmu model se užívá v tolika oborech a v tak různém pojetí, že dodnes neexistuje jednotná teorie modelování a ani jednotná terminologie. (Vachek 1980)

## **2.2. Modely – klasifikace a využití ve výuce**

Modely ve vědě jsou v historii i současné době všudypřítomné. Je těžké si představit vědu bez modelů: např. elektron-orbitálový model periodické tabulky nebo „mřížový“ model struktury soli, model fluidního toku elektřiny ve fyzice, dvou-šroubovicový model chromozomu v biologii, partikulární model světla, model velkého třesku v kosmologii, kompletní model dinosaurů z fragmentů kostí v paleontologii, model tektonických desek v geofyzice a mnoho matematických modelů v inženýrství, ekonomii apod. Pro různé účely jsou vytvářeny odlišné modely, které můžeme klasifikovat podle různých kritérií. Následující text uvádí klasifikaci modelů tak, jak jsou využívány ve výuce a dále pak nejčastější klasifikaci ve vědě.

### **2.2.1. Klasifikace modelů ve výuce (Vachek 1980)**

**Model analogie** (dále jen analogie) je model, kde mezi oběma systémy existuje vztah přirozeného izomorfismu – jeden systém podává o druhém informace nebo slouží k jeho objasnění, jestliže je jeho vhodnost ověřena praxí. Analogií by mělo být využíváno, pokud existují mezi oběma systémy podstatné shody a oblast, kterou srovnáváme, je žákům lépe známá než oblast, kterou poznávají nově. Důležitou otázkou v případě užití analogií ve výuce je, do jaké míry je identita oprávněná (Gilbert 2004). Užitím vhodné analogie jako modelu nebo i pouhého srovnání se může docílit lepšího zapamatování si vztahů. Nevýhodou je zkrácené až chybné utváření představ, užití analogie nevhodně.

### **Model idealizace**

Přínosem modelu idealizace je odhlédnutí od nepodstatných faktů, zjednodušení a schematizace složité struktury. Úskalím idealizace může být skutečnost, že si žák nedovede uvědomit, kdy pracuje s modelem a kdy s realitou. Neboli dochází ke ztotožnění modelu s realitou. Dále je důležité si uvědomit, za jakých podmínek model platí a kde jsou hranice jeho použitelnosti. Příkladem je model ideálního plynu.

Idealizace objektu představuje pro vědecké poznání důležitý mezistupeň modelu. Ve vyučování je vědecká idealizace ještě dále zjednodušována. Přitom se míra idealizace odvíjí od stupně výuky.

## **Grafické modely**

Grafické modely mají obrazně názorný charakter a mají též rysy znakových modelů. Příkladem je schematický náčrtek, schéma (zjednodušený obraz) a grafy (např. závislost rychlosti fotosyntézy na koncentraci oxidu uhličitého). Úkolem grafických modelů je názorně objasnit podstatu a průběh zkoumaných jevů. Názornost přitom představuje největší přednost těchto modelů. V grafických modelech se ilustrují nové oblasti a jevy, které jsou málo známé.

**Obraz** je model, který může být dvojího typu – pokud převládají tvarové podobnosti, mluvíme o ikonickém modelu. Pokud převládá zobrazení struktury, mluvíme o ikonicko-symbolickém modelu. Příkladem obrazu je např. schéma buňky nebo difúze.

Úskalím obrazu může být vytvoření nesprávné představy o velikosti zobrazovaného objektu. Vzhledem k plošnosti obrazu může také některým žákům dělat problém vytvořit si prostorovou představu o objektu. Tento nedostatek se dá ovšem odstranit, pokud žák vedle obrazu pozná také reálný objekt (pozorování buněk v mikroskopu s postupným proostřováním roviny pozorování, které umožňuje pohyb uvnitř rostlinného mikroskopického objektu apod.). Dalším nedostatkem je omezení funkce ikonického modelu pouze na statický pohled děje nebo stavu. Proto je nutné doplňovat obrazy pozorováním daných jevů a využití demonstrační techniky, které již podporují představu o dynamičnosti jevů (např. filmy, experimenty s osmózou apod.).

Nebezpečí špatného pochopení nebo nevhodné interpretace vzrůstá, pokud převládá znakový nebo symbolický charakter modelů, neboť zde hrají roli nejen samotný obraz, ale také mentální úroveň žáka, jeho příprava a předchozí praxe.

## **Modely znakové**

Znakové (ikonické) modely jsou lineární transformací uspořádání objektů ve světě. Žák může písmeno chápat nejen z hlediska jazyka jako znak pro určitou hlásku, ale také z hlediska matematiky jako znak pro určitá čísla nebo znak pro proměnnou. Z fyzikálního hlediska má znak specifický fyzikální obsah. Volba znaku je často otázkou konvence, přestože svou roli zde může hrát i tradice. Nevýhodou používání znakového systému je malý počet písmen a tím užívání týchž znaků v různém významu.

**Matematické modely** tvoří specifickou skupinu znakových modelů. Určitou rovnici můžeme považovat za model daného systému, pokud existuje jednoznačný vztah každého vztahu v

rovnici k definovaným prvků a vztahům v oborové oblasti. Každému pojmu tak lze přiřadit matematický symbol a spojení mezi pojmy jsou vyjádřeny matematickými rovnicemi, které lze napsat pomocí matematických symbolů. Příkladem jsou matematické modely fyzikálních veličin, zákonů a systémů. Ve fyzice se tak setkáváme s *matematickým modelem veličin* a *matematickým modelem zákonů*.

Nutností při použití matematických modelů veličin je stanovit obor jeho platnosti. Studentům by se ve vyšších třídách střední školy mělo ukázat, že pro určitý fyzikální jev existují různé modely, přestože jeden z nich byl zvolen jako hlavní nebo definující. Matematický model veličin by neměl být chápán jako matematický vzoreček. Vždy by studenti měli chápat význam dané veličiny.

Fyzikální zákon platí pouze v určité oblasti aplikace a uvnitř této oblasti platí více nebo méně přesně. Obsah fyzikálního zákona je často kvantitativní konstatování umožňující vyjádřit zákon v matematické formě – nejexaktněji matematickou funkcí. Studentům se musí ukázat konkrétní obsah matematického vztahu, který vyjadřuje fyzikální zákon. Přínosné je spojit matematickou formulaci zákona s jeho experimentálním vyvozením a není-li to ve školních podmínkách možné, je třeba vyjít z kvalitativní demonstrace a k formulaci dojít na základě myšlenkového experimentu. Student by měl být schopen umět vyjádřit fyzikální obsah rovnice vlastními slovy a uvést jednoduchý konkrétní příklad užití daného zákona.

**Mentální model** je vnitřní reprezentace okolního světa, vztahů mezi jednotlivými částmi a osobní intuitivní vnímání vlastního konání a jeho důsledků. Je to tedy subjektivní vysvětlení toho, jak věci ve světě fungují. Mentální modely určují náš přístup k řešení problémů a plnění úkolů. Mentální modely jsou ikonické – každá část modelu odpovídá každé části, kterou reprezentuje (Johnson-Laird 2006). Zakladatel System Dynamic, Fay Wright Forrester, definuje mentální model následovně:

*„Obraz okolního světa, který si neseme v hlavě, je právě model. Nikdo nemá v hlavě obrázky celého světa nebo země. Každý si nosí jen vybrané koncepty a vztahy mezi nimi a užívá jich k reprezentaci reálného systému.“*

Vývoj mentálních modelů v etapách od jeho nevyjádřené osobní formy až po vědecký model, který je obecně přijímán vědeckou většinou, a koncepční model přizpůsobený vzdělávacím účelům popisuje Gilbert (2004) následovně:



### Ontogeneze mentálních modelů

1. **Mentální model** – vnitřní, soukromá, osobní reprezentace úseku reality vytvořená jedincem, která není druhým přístupná. Např. každý student biologie má vlastní mentální model atomu nebo viru.
2. **Vyjádřený model** – vnější reprezentace, verze mentálního modelu, která byla představena veřejnosti.
3. **Konsensus model** – vyjádřený model, na kterém se shodla určitá společenská skupina jako obecně přijatelném.
4. **Vědecký model** – konsensus model, na kterém se shodla skupina vědeckých pracovníků daného oboru, např. Schrödingerův model atomu.
5. **Historický model** – překonaný vědecký model, např. Bohrov model atomu.
6. **Kutikulární (konceptní) model** – didaktická verze vědeckého nebo historického modelu, která je zjednodušená pro vzdělávací účely – např. analogie atomu jako slunečního planetárního systému.

Mentální modely jsou obvykle založeny na těžko posouditelných, napadnutelných nebo nekompletních faktech. Na druhé straně jsou také flexibilní a přístupné změnám. Mentální modely jsou nutně omezené, neboť jejich rozsah je limitován pracovní pamětí, kdy jsme schopni v daný okamžik v paměti uchovat jen určitý maximální počet elementů. Jsou v úzkém vztahu k systémové dynamice a systémovému myšlení. Ke zviditelnění mentálních modelů byl v USA pro vzdělávací účely vyvinut software Stella, pomocí kterého může učitel kontrolovat, do jaké míry student pochopil probírané téma (Richmond 2004).

#### **2.2.2. Klasifikace ve vědě**

Podle Golda (1932), rozdělujeme matematické modely na korelační a vysvětlující modely. Po **korelačních modelech** se požaduje pouze, aby odrážely pozorovaný vztah mezi dvěma nebo více proměnnými. Účelem je popsat a shrnout tyto vztahy. Obvykle se korelačních modelů využívá jako základ pro predikci a kontrolu. Po **vysvětlujících modelech** požadujeme stejně jako u korelačních, aby odrážely vztah mezi proměnnými. Navíc však vyžadujeme, aby struktura modelu vyjadřovala nějaký koncept kauzálního mechanismu, který leží v pozadí vztahu mezi proměnnými. Účelem takového modelu není ani tak popsat pozorovaný vztah, jako vysvětlit tento vztah.

**Statický model** je model, který nezahrnuje faktor času. Popisuje strukturu parametrů v systému. **Popisný model** je statický model, jenž představuje kvantitativní souhrn pozorovaných vztahů mezi řadou měřitelných proměnných (např. model snižování počtu lososů v SZ Pacifiku – měřitelnými proměnnými je hustota dopravy, využívání země lidmi atd.). Nevýhodou tohoto typu modelu je skutečnost, že neodhaluje příčinu pozorované jevu, neříká nic o vztazích mezi proměnnými a zpravidla je vytvořený model nepřenositelný na jiné případy.

**Dynamický model** popisuje systém měnící se v čase (např. denní průběh rychlosti fotosyntézy, hojnost ohrožených druhů, míra genové exprese apod.). Na počátku tvorby dynamického modelu stojí koncepční model, jež reprezentuje naši představu o tom, jak systém funguje. Důležité v této fázi je rozhodnout, které proměnné jsou důležité a které nepodstatné pro naše účely. Druhým krokem je vyjádření této představy v modelovém diagramu zahrnujícím boxy (stavové proměnné) a šipky (kauzální účinek). V dalším kroku jsou vytvořeny rovnice rychlosti každého procesu, jež jsou zkombinovány do matematického modelu. Tyto rovnice mohou být založeny na různém podkladě – na základních fyzikálních nebo chemických zákonech, případně je třeba stanovit parametry pomocí dat získaných z experimentů. Dále může být prokládána křivka experimentálními měřeními za využití různých statistických metod (Ellner, 2004).

**Boxový model** je v biologii často užívaný. Proměnnými jsou v tomto případě množství dané látky v odlišných kategoriích (kompartimentech, oddílech) uvnitř systému. Látkou může být např. množství olova v krvi, játrech, mozku,...nebo množství dusíku v různých vrstvách půdy, počet infikovaných/neinfikovaných T-buněk apod. Základním předpokladem kompartment modelů je neodlučitelnost částic uvnitř kompartmentu (např. molekuly vody). Nejznámějším příkladem kompartmentových modelů jsou biochemické reakce zprostředkované enzymy navržené Michaelisem a Mentenovou 1913. Zde jsou kompartmenty množství substrátu v počáteční, navázané a koncové formě (substrát, substrát + enzym a produkt). Jediným předpokladem tohoto modelu je zákon zachování hmoty. V biologii se také často využívají **optimalizační modely**, kde se předpokládá, že objekt zájmu (organismus, buňky apod.) se snaží dosáhnout určitého cíle, přičemž nás příliš nezajímá jak se cíle dosáhne a předpokládá se, že díky přirozené selekci se nějaký způsob najde. Příkladem může být studium propojení neuronů takovým způsobem, aby dokázal organismus co nejlépe dosáhnout stanového úkolu. (Ellner, 2004)

### **2.2.3. Potíže při začleňování modelů do výuky**

Při začleňování modelů do výuky se může vyskytnout řada problémů, kterými se zabýval Vachek (1980) a které jsou stručně shrnuty dále. Je třeba u studentů pěstovat kritické myšlení, které jim pomůže vybrat si (či vytvořit) a především posoudit vhodný model pro tvorbu závěrů o zkoumaném jevu. Tzn. naučit žáka rozpoznat podstatné znaky modelu, které jsou společné se skutečným objektem. Zvolený model nesmí být v rozporu s ostatními poznatky a nesmí být logicky sporný. Učíme studenta zhodnotit účelnost modelu (tj. zda model jednoduše, jasně a srozumitelně pomáhá vysvětlit, pochopit nebo zapamatovat si určité jevy nebo fakta). Je třeba budovat u studenta vědomí rozhodující úlohy experimentu a lidské praxe v procesu poznávání a upozornit tak na nebezpečí užití modelu mimo hranice jeho platnosti. Další nebezpečí spočívá ve ztotožňování modelu s realitou. Alespoň na typických příkladech je vhodné ukázat zjednodušenost a zidealizovanost modelů daných jevů (jež se omezuje na samotnou podstatu) a jejich aplikaci. Utváří se tak most propojující teorii s praxí a umožňující studentovi nabitě poznatky uplatnit v praktických úlohách. Není na škodu, pokud se v některých případech žákovi ukáže více možných modelů téhož studovaného jevu, aby si žák uvědomil, že neexistuje jediný správný model a vznikl náhled subjektivity modelování. Vyhneme se tím dogmatizaci ve vědomostech a podpoříme kreativní myšlení. Další úskalí spočívá v redukci chápání určitého jevu na matematický formalismus, kdy je na jedné straně studovaný jev a na druhé straně je rovnice. Abychom se tomuto vyhnuli, je třeba ve vyučování užít celého systému modelů se vzrůstající abstrakcí a obecností.

## **2.3. Matematické modelování ve výuce**

### **2.3.1. Vzrůst zájmu o matematické modelování a aplikace matematiky**

Na vzrůst zájmu o matematické modelování a aplikace matematiky<sup>12</sup> ve vzdělávání se zasloužily materiály vzniklé na podkladě řady mezinárodních zasedání ICME a ICTMA

---

<sup>12</sup> *Aplikace a modelování* jsou v posledních desetiletích ve zvýšené míře běžně užívány k označení jakýchkoli vztahů mezi reálným světem a matematikou. Pojem *modelování* je přitom zaměřen na vztah ve směru od reality k matematice a zároveň je obecně zdůrazněn prvek procesu. Pojem *aplikace* je zaměřen na vztah ve směru od matematiky k realitě a obecně je zdůrazněn prvek objektu – tj. jaká část reálného světa je přístupná pro matematické zpracování nebo pro jakou část reality existuje odpovídající matematický model.

konaných pod záštitou organizace ICMI. Otázku významu matematického modelování a aplikací matematiky dále otevřely výsledky studie OECD PISA (Blum 2002).

**The International Commission on Mathematical Instruction, ICMI**<sup>13</sup>, je mezinárodní organizace založená roku 1908, jejímž zaměřením je rozvoj matematického vzdělání na všech úrovních. ICMI nabízí veřejnou diskusi k podpoře spolupráce, výměně a šíření myšlenek na poli matematického vzdělávání od základní po univerzitní úroveň. Dalším cílem ICMI je umožnit propojení mezi výzkumníky ve vzdělávání, tvůrci kurikula, tvůrci vzdělávací politiky, učiteli matematiky, odborníky matematiky apod. ICMI iniciuje zavádění nových aktivit a dalších programů do výuky prostřednictvím vydávání sborníků nebo publikací. Mezi mezinárodními organizacemi věnujícím se matematickému vzdělávání má ICMI zvláštní postavení díky těsnému sejití profesionální komunity matematiků a učitelů matematiky.

Hlavní zodpovědností ICMI je plánovat jednou za čtyři roky **International Congress on Mathematical Education, ICME**. Plánování zahrnuje výběr hostující země, vytvoření vědeckého programu a zvolení prezentujících. V roce 1976 na třetím kongresu ICME-3 Henry Pollak vyzýval po integraci aplikace a modelování do matematického vzdělávání. Od ICME-5 konaného v roce 1984 se téma aplikace a modelování stalo pevnou součástí programu.

**The International Conferences on the Teaching of Mathematical Modelling and Applications, ICTMA**<sup>14</sup>, je členská organizace, jejíž cílem je podpora aplikací a modelování ve všech oblastech matematického vzdělání – od základních škol přes střední školy až po univerzity. Významnou charakteristickou ICTMA je styčná plocha, kterou poskytuje pro spolupráci mezi těmi, jejichž hlavní aktivita spočívá v aplikaci matematiky, a těmi, jež se zabývají převážně vzděláváním. V roce 2003 se ICTMA stala výzkumnou skupinou přidruženou ICMI. ICTMA pořádá každé dva roky zasedání, z něhož vzejde publikace věnovaná tematice matematického modelování ve výuce.

První zasedání ICTMA-1 se konalo v roce 1983. Za organizaci zodpovídali John Berry, Burghes, Huntley, Glynn James a Alfredo Moscardini. Většina příspěvků byla věnovaná

---

<sup>13</sup> [www.mathunion.org/icmi/home/](http://www.mathunion.org/icmi/home/)

<sup>14</sup> [www.ictma.net/index.html](http://www.ictma.net/index.html) a [www.icmihistory.unito.it/ictma.php](http://www.icmihistory.unito.it/ictma.php)

vysokým školám, z nichž jen některé podávaly zprávy o vývoji na školách. V roce 1985 byla uspořádaná druhá konference ICTMA-2, kde zavládl obecný pocit, že na úrovni vysokých škol je problematika modelování dobře zpracovaná.

Další tři konference se konaly po řadě v Německu (1987), Dánsku (1984) a Nizozemí (1991). Organizátory byli Werner Blum, Mogens Niss and Jan de Lange. Do popředí diskuse se v tuto chvíli dostává otázka uplatnění matematického modelování na středních školách.

ICTMA-6 (1993) konané v USA organizoval Cliff Sloyer. Zasedání se zabývalo třemi otázkami – význam praxe a výzkumu, efektivita skupinové výuky a výuka založená na technologii. ICTMA-7 (1995) obsahovala témata podobná minulým létům. ICMA-8 (1997) se pořádalo v Austrálii pod vedení Petera Galbraitha. Poprvé se v titulcích objevilo slovo technologie, které upozorňuje na skutečnost, že využití technologií je vysoce žádoucí ve výuce aplikací a modelování. ICTMA-9 (1999) se přesunulo do Portugalska. Zodpovědnou osobou byl João Filipe Matos. Toto zasedání bylo naplněno více filozofickým ovzduším. Centrem zájmu se staly otázky inovace ve využití technologií a matematických metod, inovace kurikula a pedagogické otázky. ICTMA-10 (2001) proběhlo v Číně.

ICTMA-11 (2003) se uskutečnilo opět v USA. Jako organizátor byla zvolena Susan Lamon. Na tomto zasedání bylo představeno mnoho kvalitních prezentací, jež se mimo jiné zabývaly implementací matematického modelování na základních školách. Mezi prezentující je možno zmínit např. Lyn English, která se zabývala zaváděním modelových aktivit právě na základní škole.

**Organization for Economic Co-operation and Development, OECD<sup>15</sup>**, je organizace založená v roce 1961, jejímž cílem je rozvoj a prosperita členských zemí – podpora udržitelného ekonomického rozvoje, podpora zaměstnanosti, zvýšení životního standartu a zachování finanční stability. OECD je hlavním zdrojem ekonomických dat. Mezi její aktivity patří výzkumy zaměřené na zlepšení vzdělávání, uchování životního prostředí nebo boj proti korupci.

---

<sup>15</sup> [www.oecd.org/home](http://www.oecd.org/home)

OECD **Programme for International Student Assessment, PISA**, si klade otázky typu: „Jsou studenti dobře připraveni na budoucí výzvy?“, „Dokáží studenti efektivně analyzovat, argumentovat a komunikovat?“ nebo „Jsou studenti schopni pokračovat v celoživotním vzdělávání?“. Na tyto otázky odpovídá projekt PISA prostřednictvím mezinárodních srovnávacích výzkumů prováděných v tříletých cyklech s patnáctiletými studenty. Hodnotí se výsledky v oblasti čtenářské, matematické a znalostní gramotnosti.

Dle definice matematické gramotnosti PISA klade důraz na schopnost vnést matematické znalosti do funkčního užití ve velkém množství různých situací a souvislostí. Proto matematizace reálné situace, stejně jako interpretace, reflexe a valorizace matematických výsledků v reálném světě je podstatný proces při řešení problémově-orientovaných aktivit. Na základě publikovaných výsledků prvního cyklu PISA (2000) se v některých zemích otevřely diskuse týkající se cílů a nové podoby matematického vzdělání. Speciálně se do popředí dostaly otázky zabývající se rolí matematického modelování, aplikací matematiky a vztahu matematiky k reálnému světu (Blum 2000, OECD PISA 2000).

### **2.3.2. Význam matematického modelování ve výuce**

Matematické modelování (MM) poskytuje možnost, jak se vypořádat se stále vzrůstajícím množstvím nových informací. Velký objem poznatků bývá často nepřehledný, a tím se zhoršuje jejich využitelnost. Model poskytuje přehlednou strukturu, do které pak snáze začleníme nové poznatky (Vachek 1980). Modelování představuje ve výuce aktivní způsob osvojování vědomostí, student má možnost objevovat a něco budovat (Richmond 2004). Oproti tomu při pasivní výuce pouze vstřebává informace, které před ním již někdo zpracoval. Modelování má ve výuce bezesporu pozitivní dopad na rozvoj myšlení. Dnes je často kritizován přístup, ve kterém se zaměříme na detailní probádání určitého tématu, ale přitom již nejsme schopni vidět celek (Polak 1970, Lingefjärd 2002, Richmond 2004). Prostřednictvím modelu se můžeme nad detaily povznést, utvořit si celkový obraz. Prostřednictvím tvorby modelu se rozvíjí myšlení ve zpětných vazbách, posouvá se důraz na nalezení vzorů chování v systému nikoli pouze na události nebo maximální výčet faktorů, které nějaký proces ovlivňují.

*Dokonalosti je dosaženo tehdy, když nezůstane nic, co by se dalo odebrat, nikoli když neexistuje nic, co by se dalo přidat“.*

*St. Exupèry*

Při tvorbě modelů se uplatňuje tvořivost, kritické myšlení, tvorba závěrů a ověřování jejich platnosti. Rozvíjí se tedy klíčové kompetence – kompetence k řešení problémů, k učení a kompetence komunikativní.

### **2.3.3. Zařazení modelování do výuky matematiky**

Přibližně od poloviny roku 1980 vzrůstá mezi badateli zájem o proces modelování jako nástroj ve výuce matematiky. Od roku 1990 se po celém světě matematické modelování dostává do popředí kurikula matematiky. Vzrůstá potřeba po rozvoji kompetencí modelovat. Význam podpory matematických aplikací a matematického modelování je obecně přijímán. Důvody pro zavádění modelování do kurikula jsou:

- (a) posílení kreativity, rozvoj otevřeného a aktivního postoje k řešení problémů,
- (b) rozvoj kritického potenciálu, schopnosti obhajoby a argumentace,
- (c) rozvoj schopnosti práce ve skupině, komunikace o a skrze matematiku,
- (d) budování schopnosti praktické aplikace matematiky a modelování,
- (e) uvědomění si významu matematiky v každodenním životě a úlohy matematiky v životním prostředí a ve vědě,
- (f) utváří se náhled na matematiku nejen jako na produkt, ale též jako proces,
- (g) utváří se náhled subjektivity modelování (kdy je modelování závislé např. na cíli, matematických nástrojích a kompetencích studenta),
- (h) v neposlední řadě se rozvíjí porozumění matematickým konceptům, pojmům, metodám a výsledkům.

Předpokládá se, že kompetence k modelování a aplikacím, které se rozvinou v rámci určitého typu oblasti nebo kontextu, mohou být přeneseny do jiného typu oblasti s jinými vlastnostmi a charakteristikami. Mnoho studií však ukázalo, že takový transfer je ve svém rozsahu omezen. Studie PISA (<http://clanky.rvp.cz>) zdůrazňují jako cíl matematického vzdělání rozvoj schopnosti využití matematiky v přítomnosti a budoucnosti. Matematika by tak neměla být jen výukou příkladů založených na realitě, jako je např. užití dluhů pro zavádění negativních čísel. Orientace na realitu by měla mít centrální roli ve výuce matematiky.

Polak (1970) upozorňuje v matematickém vzdělání na skutečnost, že jsou studenti často stavěni před problém, jež mají vyřešit. Nebo je jim předepsána věta, kterou mají dokázat. Zřídka ale mají příležitost sami objevit problém, který je třeba řešit. Nebo objevit situaci a

zjistit, kterou větu je třeba dokázat. Přirovnává tak hodinu matematiky k turistické cestě po označené cestě, kterou procházíme po ustálené sekvenci turistických zastávek, na které je minimální nebezpečí, že se střetneme s obtížemi. Lingefjärd (2002) nabízí jako možnost uplatnění Polakovy vize „objevovat vlastní cestu“ využití modelování v hodině matematiky.

Přes veškeré snahy o zařazení modelování do výuky se však ukazuje, že mezera mezi ideály stanovenými v inovovaném kurikulu matematiky a každodenní vzdělávací praxí je stále veliká. Navíc teorie výuky matematického modelování není zdaleka kompletní. Je třeba více výzkumů na poli výukových problémů vyskytujících se v průběhu modelových aktivit, do kterých jsou studenti zapojeni. Mezi výzkumnými aktivitami dále převládá výzkum kompetencí, identifikace strategií používaných studenty, jež se zabývají aplikačními problémy, pozorování a analýza výuky obecně nebo studium výuky a komunikace v hodinách orientovaných na modelování (Chenk 2001, Blum 2002, Kaiser a Schwarz 2006, García 2006, Lingefjärd 2006).

V následujícím textu krátce zmíním zkušenosti ze zemí, které se zabývaly implementací matematického modelování do kurikula.

### **Austrálie**

Dle některých výzkumů nebývá slabý výkon v matematice důsledkem nedostatků schopností nebo potenciálů studenta, ale spíše vzdělávací praxí (Tate, Rousseau 2002). Lamon (2003) poukázala na skutečnost, že široké spektrum studentů (bez ohledu na věk nebo třídu) bylo schopné dosáhnout stupně, kdy se zapojili do matematického modelování. Zatímco dříve bylo modelování spíše doménou středních škol, dnes je navrhováno, aby děti začaly s vývojem matematického modelování již na základní škole. Ukázalo se, že děti na základní škole se mohou úspěšně účastnit programů modelových problémů, jež jsou samozřejmě řešeny na různých stupních obtížnosti (English 2004, 2006).

English (2003) uvádí následující aktivity určené dětem základních škol předcházející samotnému matematickému modelování:

- Interpretace matematických a vědeckých informací prezentovaných v textu
- Čtení jednoduchých informací z tabulek
- Sběr, analýza a reprezentace dat
- Příprava psané zprávy z analýzy dat
- Práce ve skupině



- Prezentace výsledků skupinové práce svým spolužákům
- Diskuse

Přípravná fáze modelových aktivit by měla začínat stádiem, kdy vznikne v dětech potřeba vytvoření modelu k popisu, vysvětlení nebo predikci chování daného systému. Na počátek se může zařadit diskuse třídy o matematice a matematickém řešení určitého problému. Žáci by měli být vedeni k práci s tabulkami a interpretaci informací obsažených v matematických datech (tvorba, užití, modifikace veličin, formulace pojmů, objevování vztahů a trendů, reprezentace výsledků). V další fázi žáci zkouší aplikovat model na podobně strukturovaný problém, ale v rámci jiného kontextu (English, 2006).

V Queenslandu proběhly v letech 1990 a 1991 první iniciativy v implementaci matematického modelování do kurikula matematiky na omezeném počtu středních pilotních škol. Další pokusy proběhly v letech 2005 a 2007 v rámci pokračující studie *Curriculum Change in Secondary Mathematics*. V tomto případě ze studie vyplynulo, že matematické modelování je pro střední školy obtížné, nicméně učitelé pocítují změnu kurikula matematiky jako lákavou výzvu (Stillman 2009).

### **Německo**

V roce 2000 byl v Německu založen projekt *Matematické modelování ve školách*. Zpočátku se zvolený problém zdál být pro střední školy příliš obtížný. V průběhu projektu se ukázalo, že propojení matematiky s problémy každodenního života jsou významným motivačním činitelem. Studenti se poprvé setkali s nutností nashromáždit dostatek informací z ne-matematické oblasti, což je nutností pro vytvoření jakéhokoli modelu. Matematické modelování poskytuje slušnou základnu pro interdisciplinární spolupráci, čímž jde v souladu s reformami ve školním vzdělávání, zejména myšlenkou mezioborové spolupráce a problémové výuky (English 2004, Kaiser a Schwarz 2006).

### **2.3.4. Zařazení do výuky ostatních předmětů**

Richmond (2004), stejně jako mnozí jiní před ním, upozorňuje na přetíženost studentů informacemi, nízkým stupněm jejich aktivního osvojování a převahou pasivního učení. V procesu učení zdůrazňuje dvě složky – myšlení a komunikaci. Přitom myšlení definuje jako tvorbu mentálních modelů a simulaci, jež provádíme za účelem dosažení určitého řešení dané situace. Při konstrukci každého mentálního modelu přitom musíme zvážit, které aspekty do modelu zahrneme a které zanedbáme, jak reprezentujeme vybrané aspekty a vztahy mezi nimi. Richmond dále uvádí, že během memorování dat, jmen a faktů neboli získávání znalostí

není žák aktivní – nevytváří mentální modely, nemusí rozhodovat, které aspekty jsou důležité a které nikoli, není třeba simulovat. Tzn. dle výše uvedené definice, že student nemyslí. Odkazuje se přitom zejména na osoby, které utvářejí hodnotící systém a standardy prospěchu a zaměřují přitom pojmy „znát“ za „rozumět“ a „inteligence“. Jako nástroj pro „zviditelnění“ mentální modelů vyvinul software Stella – modelovací prostředí pro simulace z řady oborů - biologie, fyzika nebo literatura.

Podobně popisuje Gilbert (2004) kurikulum současného vzdělávání jako „sedimentární“ – stále nové informace jsou přidávány ke stávajícím za vzniku nesouvislého obsahu a nadměrné náloži izolovaných faktů. Jako řešení navrhuje kurikulum založené na modelech. Jako příklad uvádí historicky po sobě jdoucí modely acidita/alkalita:

Antika:	Behaviorální model
1777:	Lavoisierův model a Priestleyův model
1884:	Arrheniův model
1923:	Bronsted-Lovriův model a Lewisův model
1939:	Usanovitchův model

Návrh na výklad určitého tématu prostřednictvím modelů má vzdělávací hodnotu pouze tehdy, pokud objasníme, že daný model poskytuje určité vysvětlení, ale pokud neposkytuje vysvětlení nových faktů, je zavržen.

V současné době nicméně nejsou učitelé vzdělávání a trénování v této oblasti. Má-li být kurikulum založené na modelu úspěšně realizováno, je potřeba, aby učitelé disponovali následujícími znalostmi a dovednostmi:

- Znalost oboru včetně vyčerpávajícího porozumění kurikulumním modelům (tj. zjednodušených vědeckých nebo historických modelů, které jsou určeny pro vzdělávání).
- Znalost kurikula – kdy, jak a proč zařadit obecné principy modelování a modelů a detaily kurikulumních modelů do kurikula oboru či výuky.
- Pedagogické dovednosti – schopnost vést modelové aktivity, chápat způsob, jak studenti tvoří vlastní mentální modely, vhodně zacházet s výslednými modely.

### **2.3.5. Výuka založená na počítačích – Stella software**

Na středních školách můžeme identifikovat dva hlavní trendy práce s počítači s ohledem na to, jak jsou ve výuce využívány. V prvním případě počítače pomáhají dosáhnout cílů školního systému. V druhém případě je počítačové prostředí využito pro představení matematických

představ a matematického obsahu, jenž obvykle přesahuje hranice kurikula a vzdělávací cíle středních škol. Tyto obsahy běžně náleží do pokročilejší matematiky, které jsou často součástí vysokoškolského kurikula. Druhý trend zahrnuje užití modelování, simulační aplikace a různých druhů databází (tabulkové a grafické). Příklady počítačových prostředí využívaných ve výuce matematiky jsou *SimCalc MathWorld* a *Cabri Geometrie*, dále tabulkové procesory (v současné době je nejpoužívanější Microsoft Excel) a modelovací prostředí *MatLab*, *Stella* a *Coach 6* (English 2002).

**SimCalc MathWorld**<sup>16</sup> je interaktivní program, který je možno využít pro výuku algebry. Účelem SimCalc Math World je ukázat vztah mezi funkcí a její grafickou reprezentací. Grafická reprezentace umožňuje studentům vizuálně analyzovat funkce a její globální chování. **Cabri Geometrie**<sup>17</sup> je software určený zejména pro výuku geometrie na školách. Cabri je výsledkem neustálé spolupráce mezi počítačovými odborníky, matematiky, specialisty ve vzdělávání a praktikujícími učiteli (English 2002).

**MatLab**<sup>18</sup> je programové prostředí a skriptovací programovací jazyk pro vědeckotechnické numerické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, počítačové simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů. Používá se celosvětově na univerzitách k výuce matematiky a inženýrských oborů, ve vědeckých institucích, ale také v průmyslu při výzkumu, vývoji a analýze dat. Prostedí MatLab je vyučováno na většině našich technických fakult. Matlab je nicméně nejen silným prostředkem v případě řešení složitých problémů současné vědecké a technické praxe, ale také pro kvalitní grafické výstupy a srozumitelnou syntaxi zdrojového kódu může být Matlab efektivně využit i při výuce fyziky na středních školách. Díky jednoduchému ovládnání lze s MatLabem samostatně pracovat a řešit jednodušší příklady již po krátkém vysvětlení. Implementaci výukového softwaru MatLab do výuky na středních školách realizuje např. SPŠ a VOŠ Písek<sup>19</sup>. (Abrahám 2005, Tesař & Bartoš).

---

<sup>16</sup> [www.kaputcenter.umassd.edu/products/software/smwcomp/download/](http://www.kaputcenter.umassd.edu/products/software/smwcomp/download/)

<sup>17</sup> [www.cabri.net](http://www.cabri.net)

<sup>18</sup> [www.mathworks.com/products/matlab/](http://www.mathworks.com/products/matlab/)

<sup>19</sup> <http://www.sps-pi.cz/implementace-vyukoveho-softwaru-matlab>

**Coach 6**<sup>20</sup> je softwarové výukové prostředí, které integruje všechny potřebné nástroje – kolekce dat ze senzorů (např. senzor krevního tlaku, elektrické vodivosti, CO<sub>2</sub> senzor, kolorimetr a další), záznam videa a modelování dynamických systémů. Coach nabízí tři režimy tvorby a prohlížení modelů: režim grafický, textový a režim rovnic. Grafický režim je podobný modelovacím softwarům System Dynamics založených na zásobnících (stock) a tocích (flow). Data získaná měřením, generovaná modely nebo importovaná z jiných souborů mohou být dále upravená a analyzována s pomocí pokročilejších nástrojů. Student může uložit výsledky své práce jako soubor, který obsahuje texty, obrázky nebo videa a vytvořit tak závěrečnou studentskou zprávu. Coach má široké uplatnění ve výuce fyziky, kde slouží ke sběru a zpracování dat z fyzikálních experimentů, které by se jinak obtížně realizovaly, např. měření rychlosti šíření zvuku ve vzduchu (Pešat 2010).

**Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation, STELLA**, je modelovací prostředí, které bylo vytvořeno jako podpora pro výuku komplexních systémů, jež zahrnují koncept dynamické změny a zpětné vazby. Jeho výhodou je snadné užití, schopnost vytvořit a sdílet modely pro různé účely. Software je ideální pro prezentaci konceptů testované hypotézy a výuku složitých systémů. Stella se hodí spíše pro tvorbu jednodušších modelů a je nejvhodnějším nástrojem pro studenty, kteří nemají pevné základy v matematice.

Stella podporuje různé učební styly – verbální, vizuální a auditivní. Zatímco verbální typ studenta upřednostňuje čtení, psaní a diskuse, pro vizuální typ jsou vhodné jako doplněk výuky mapy, grafy, diagramy a obrázky. Auditivní typ se nejlépe učí z mluveného slova, proto jsou opět vhodné diskuse, nahrávky a videa. Pro vizuální typy Stella nabízí řadu možností – storytelling (vyprávění příběhu), diagramy, grafy a animace, které pomáhají studentovi objevit vztah mezi proměnnými v rovnici. Pro studenty, kteří preferují verbální styl učení, můžeme vizuální model doplnit příloženými dokumenty a texty. Pro auditivní typy je možné připojit videa a zvukové nahrávky (Richmond 2004).

---

<sup>20</sup> [www.cma.science.uva.nl/english/Software/Coach6/Coach6.html](http://www.cma.science.uva.nl/english/Software/Coach6/Coach6.html)

## 2.4. Systémová teorie, systémová dynamika a systémové myšlení

### 2.4.1. Filozofické pozadí softwaru Stella

**Obecná systémová teorie (General Systems Theory, GST)** je transdisciplinární přístup mající původ ve čtyřicátých letech. Nejčastěji uváděným otcem GST je Ludwig von Bertalanffy. GST považuje systém za soubor nezávislých a vzájemně interagujících částí. Hlavním cílem je studium obecných principů fungování systémů, které by se daly aplikovat na každý typ systémů ze všech oblastí výzkumu (Larses 2005).



**Obr. 11 J.W.Forrester**  
(převzato z  
[www.proverbs.cz/media/forrester.jpg](http://www.proverbs.cz/media/forrester.jpg))

Způsob nahlížení na svět, **Systémová dynamika (Systems Dynamics** <sup>21</sup>), byl založen v letech 1950 profesorem Jay W. Forrestrem na Massachusetts Institute of Technology, MIT. Systémová dynamika je jako jeden aspekt systémové teorie metodou pro pochopení dynamického chování komplexních systémů (Forrester 1994). Každý prvek statického systému je statický. Ostatní systémy, ve kterých je alespoň jeden element dynamický, musí být dynamické. Základem této metody je

rozpoznání struktury systému, cyklických vztahů a časového opoždění vlivu jednotlivých složek. Systémová dynamika podporuje interdisciplinární spolupráci a syntézu vědomostí, kdy se matematika stává přirozenou součástí všech oborů. Příkladem dynamického systému je např. sociální dynamika.

**Systémové myšlení (SM, Systems Thinking** <sup>22</sup>) má svůj základ v systémové dynamice a představuje určitý sdílený světonázor a soubor metod, modelů, dovedností, přístupů a hodnot. Jde o přístup řešení nebo nahlížení problémů jako součásti většího celku, tj. přístup k řešení problémů orientujících se na vzájemné vztahy mezi částmi systému a jejich vztahem k funkčnímu celku. Tradiční analýza problému studuje jen jednotlivé části celku. SM se oproti tomu zaměřuje na studium částí v interakci s ostatními složkami systému – místo izolace stále

---

<sup>21</sup> <http://www.proverbs.cz>

<sup>22</sup> <http://www.systems-thinking.org/stada/stada.htm>

menších a menších částí systémů rozšiřuje pohled na systém, kdy zahrnuje stále větší a větší počet interakcí. SM se zaměřují spíše na cyklický než lineární vztah příčiny a účinku (Aranson 1996).

Systémové myšlení můžeme též chápat jako soubor návyků, činností spojených s řešením problémů<sup>23</sup> – jako jsou např. snaha o pochopení co největší části reality („vidět les, ne jen strom“), pozorování změn jednotlivých prvků systému v čase a jaké znaky chování vykazují (např. na grafu), objevení cyklického charakteru komplexu vztahů příčiny a důsledku, rozpoznání časového opoždění účinku ve vztahu příčina-důsledek, zvážení krátkodobých i dlouhodobých důsledků provedených opatření vedoucích ke změně dynamického systému, apod. Nebo na SM můžeme nahlížet jako na soubor nástrojů pro řešení problémů – jako jsou diagramy kauzálních smyček, zásobníků a toků a simulační modely – které nám pomohou zmapovat si a objevit dynamickou spleť systému (Richmond 2004).

Díky svému holistickému zaměření se ve světě konceptu SM dostalo zvýšené pozornosti v různých oblastech společnosti. Ani ve vzdělávání není koncept SM nový a dochází k jeho uplatnění v rámci snahy o reformu ve školství, která volá po redukci memorování a zvýšení schopnosti poznatky z různých oborů a oblastí syntetizovat, schopnosti kriticky myslet, efektivně komunikovat, řešit problémy a dlouhodobě se vzdělávat.

**Systémové modelování (Systems Modelling)** je metoda zahrnující využití modelů nebo



simulací s cílem zlepšit pochopení komplexních systémů a zlepšení efektivity naší činnosti v rámci těchto systémů. Systémově dynamické modely jsou určeny pro obecné porozumění systému, ne pro predikci (Ford 1999, Trochim 2006). **Systems Thinking Software** je nástroj pro lepší porozumění různým druhům dynamických systémů od přírodního prostředí přes týmovou dynamiku po ekonomický trh. **Barry Richmond** (1947 – 2002) je znám jako leader na poli systémového myšlení a systémové dynamiky, který vyvinul modelovací prostředí pro

**Obr. 12 B.Richmond**  
(převzato z Richmond 2004)

<sup>23</sup> [www.watersfoundation.com](http://www.watersfoundation.com)

simulace, Stella a iThink, kde Stella je určena školám a iThink firmám.

Stella disponuje nástroji, které umožňují uplatnit všechny výše uvedené návyky a činnosti přístupu SM. Dovoluje tak studentovi vizualizovat a testovat jeho myšlení prostřednictvím počítačové simulace. Přes 10 let je v USA systémově dynamické modelování užíváno K-12 učiteli<sup>24</sup>. Modelování bylo implementováno do mnoha oblastí kurikula na všech stupních vzdělání.

Vyjádří-li studenti své myšlenky užitím vizuálních nástrojů, může učitel rozpoznat špatné pochopení kurikulárního obsahu. Při užití konceptu a nástrojů SM student vykazuje zvýšenou motivaci, podíl na výuce a sebehodnocení. Dynamické modelování umožňuje studentům získat schopnost analyzovat graf (výstup modelu) a také pomáhá studentovi rozlišit struktury uvnitř systému, které přispívají k lineárnímu růstu nebo rozkladu a též nelineárnímu charakteru změn, např. exponenciální růst. Výzkumy provedené v USA ukazují, že optimální výuka by měla být zaměřena na studenta, zážitková, holistická a autentická. Student by měl mít možnost užití mnoho forem vyjadřování, příležitost k reflexi, interakci a spolupráci s ostatními studenty. Efektivní aplikace systémového modelování všechny tyto charakteristiky zahrnuje (Zemelman 1998).

**Isee Systems** je společnost, světový leader a inovátor v Systems Thinking software, která byla založena roku 1985. První aplikací, jež přivedla systémové myšlení do počítačů, byl *Stella* software, jež je primárně užíván pro vzdělávací účely. Isee Systems dále nabízí *iThink* pro simulace v podnikání, managementu apod. **Isee NetSim** umožňuje publikovat modely vytvořené v softwaru Stella nebo iThink na webu, a tím sdílet modely se svými kolegy<sup>25</sup>. Modely mohou být shlédnuty kýmkoli, kdo má nainstalovaný volně dostupný prohlížeč.

#### **2.4.2. Systémové myšlení a program GLOBE**

Tato diplomová práce byla vypracována na základě zapojení týmu z Katedry experimentální biologie rostlin PřF UK do mezinárodního projektu GLOBE – koloběh uhlíku. **Global**

---

<sup>24</sup> **K-12** je pojem užívaný v USA, Kanadě a některých oblastech Austrálie pro souhrnné označení základního a středoškolského vzdělání.

<sup>25</sup> <http://www.iseesystems.com/community/downloads/NetsimModels.aspx#3>

**Learning and Observation to Benefit the Environment, GLOBE ([www.globe.gov](http://www.globe.gov))**, je dlouhodobý mezinárodní program vyvinutý v USA, kterého se v současné době účastní 111 zemí z celého světa. Jeho cílem je zlepšit povědomí lidí o stavu životního prostředí a podpořit prohlubování znalostí v oblasti přírodních věd a techniky na základních i středních školách. Přístup k pochopení významu uhlíku v klimatickém systému Země je systémový, tj. je nutno jej zkoumat na více vzájemně propojených úrovních. Experimenty prováděné ve třídách přinášejí globální pohled na problematiku. Využití počítačových modelů na různé úrovni komplexnosti posilují nejen systémový přístup, ale také představují studentům důležitý vědecký nástroj nutný pro pochopení klimatických změn.

GLOBE - Koloběh uhlíku prezentuje projekty a materiály, které umožní včlenit různé aktivity přizpůsobené studentům středních a vysokých škol do výuky. Podílem v projektu Koloběh uhlíku se studenti učí přístupu systémového myšlení a zároveň umožní osvojení základních znalostí o koloběhu uhlíku a jeho vztahu k energii a klimatu.



### **3. Materiál a metodika**

#### **3.1. Použité softwary**

Výukové modely byly vypracovány v programu **Stella 9.0.2**, který je jedním ze Systems Thinking software. Tento program pomáhá objasnit spojení mezi procesy systému a jeho strukturami. Ideou jeho vytvoření je zkvalitnit způsob myšlení – cílem je vidět celek, dokázat se povznést nad detaily. Jde o způsob dynamického zviditelnění toho, jak komplexní systémy skutečně fungují. Smyslem použití Stelly často bývá, že se pracuje s koncepty a nikoli se vzorci, základními představami o kauzálních smyčkách a o tom, jak spolu jednotlivé faktory souvisí (viz pozn.25). Matematika tak často ustupuje do pozadí (Richmond 2004).

#### Systémové požadavky Stella 9.0.2

##### **Windows**

- 233 MHz Pentium
- Microsoft Windows™ 2000/XP/Vista/7
- 128 MB RAM, 90 MB prostor na disku
- QuickTime 7.6.5 nebo dřívější verze.

##### **Macintosh**

- 120 MHz PowerPC nebo jakýkoli Intel-based Mac
- Mac OS 10.2.8 nebo 128 MB RAM
- 90 MB prostor na disku
- QuickTime 7.6.4 nebo dřívější verze

Zakoupení licence činí US \$1 899,00.

**Isee Runtime 9.0.2** je určen pro prezentaci modelů v režimu full-screen. Spustit lze modely vytvořené jak v softwaru Stella, tak iThink. Isee Runtime umožňuje uživateli uložit změny v nastavení parametrů, pokud to autor povolí. Nezobrazuje se vrstva Map a Model. Pro otevření modelu v Isee Runtime je třeba nejprve model v softwaru Stella uložit jako Runtime soubor. K ukončení prezentace je třeba použít klávesové zkratky ctrl + Q. Náklady činí US \$ 99,00.

**Isee Player 9.0.2.** je na rozdíl od Isee Runtime volně stažitelný prohlížeč, který je určen pouze pro „čtení“ modelů vytvořených v softwaru Stella nebo iThink. V prohlížeči máme přístup k liště nástrojů, menu a všem vrstvám. Nicméně je zde omezená možnost úprav, nelze

uložit změny parametrů a není možná full-screen prezentace. Výhodou je nulová finanční zátěž pro školy. Nevýhodou použití prohlížeče ve výuce je nemožnost vytvořit si vlastní model, neboť ve vrstvě *Model* a *Map* není přístupná lišta nástrojů. Systémové požadavky pro Windows jsou stejné jako u Softwaru Stella s 10 MB prostorem na disku navíc.

**Microsoft Visual Studio 2008** je integrované vývojové prostředí (IDE) od společnosti Microsoft určené zejména pro vývoj konzolových aplikací a aplikací s grafickým uživatelským rozhraním (GUI). Visual Studio obsahuje editor kódu s podporou automatického doplňování kódu IntelliSense. Dále obsahuje řadu vestavěných nástrojů jako je debugger, designer formulářů pro tvorbu GUI, nebo např. designer tříd. Mezi vestavěné jazyky Visual Studia patří C/C++, C# a Visual Basic. Podpora dalších jazyků může být přidána pomocí rozšíření.

### 3.2. Tvorba modelů

V programu Stella byly vytvořeny modely:

- 1) *Vyvětrej si* zaměřený na pochopení vlivu CO<sub>2</sub> na zdraví člověka. Vzrůst koncentrace oxidu uhličitého v uzavřené místnosti je v modelu důsledkem dýchání člověka.
- 2) model vlivu oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy a
- 3) model vlivu obsahu dusíku v listech na rychlost fotosyntézy – viz kapitola 4. Tyto modely byly vytvořeny na základě empirických modelů od autorů: Model *Vyvětrej si* je vytvořen na základě práce J. Svobodové (2010) zabývající se návrhem ventilace, která zajistí optimální intenzitu větrání pro udržení kvality vzduchu interiéru na požadované úrovni. Vztahy použité v modelu *01 P(C,I)* jsou převzaty od Thornley (1976) a Robert, Porter (2006). Vztahy použité v modelu *02 P(N, C, I)* jsou převzaty od Dewar (1996) a Leegood a kol. (2000). Hodnoty parametrů jsou skutečné, naměřené a jsou založené na více zdrojích. Struktura modelu byla vytvořena v souladu se systémovým myšlením (Richmond 2004) na podkladě informací získaných z literatury uvedené v seznamu literatury.

### 3.3. Tvorba pracovních listů a metodických manuálů

Pracovní listy (viz příloha 9.1) byly vytvořeny pro ulehčení práce s modely. Ke každému pracovnímu listu byl vypracován metodický manuál pro učitele – viz příloha 9.2. Každý manuál obsahuje cíl, očekávané výstupy, doporučený postup práce s pracovním listem, předpokládanou časovou náročnost, potřebné pomůcky, seznam použité literatury a řešení úloh.

## 9. Příloha

### 9.1. Pracovní listy pro studenty

9.1.1. Pracovní list 01 – Ppm

9.1.2. Pracovní list 02 – Vyvětrej si

9.1.3. Pracovní list 03 – Cesta do hlubin

9.1.4. Pracovní list 04 – Ozářenost a oxid uhličitý

### 9.2. Metodické manuály pro učitele

9.2.1. Metodický manuál 01 – Ppm

9.2.2. Metodický manuál 02 – Vyvětrej si

9.2.3. Metodický manuál 03 – Cesta do hlubin

9.2.4. Metodický manuál 04 – Oxid uhličitý a ozářenost

## **3.4. Podpůrné materiály**

Pro snazší proniknutí do práce se softwarem Stella, ve kterém jsou modely vytvořeny, a jejíž osvojení je pro práci s modely nezbytné, byla vytvořena prezentace, na kterou jsou vázána cvičení ověřující pochopení problematiky – viz příloha 9.3. Učitelům je pak určena verze s řešením – viz příloha 9.4. Podpůrné materiály vytvořené v Microsoft Visual Studio 2008 (*Ppm konvertor a Program na výpočet kvantového výtěžku* – viz kapitola 0) nejsou nezbytnou součástí práce s modely. Byly vytvořeny pro zájemce, kteří by chtěli hlouběji pochopit vztahy uvnitř modelu.

## **3.5. Ověřování materiálů**

Modely vytvořené v softwaru Stella byly představeny 11.-12.6. 2010 na semináři GLOBE. Pro získání zpětné vazby pro dopracování materiálů byl sestaven dotazník – viz příloha 9.5.

Dotazník je rozdělen na část A, ve které jsou hodnoceny materiály podporujících práci s modely, a část B, ve kterých jsou hodnoceny matematické modely. Část A obsahuje čtyři uzavřené otázky s výběrem odpovědí a s možností doplnění vlastních poznámek a dále jednu otázku otevřenou. Část B obsahuje dvě otevřené otázky a 5 otázek uzavřených s výběrem odpovědí a možností doplnění vlastních poznámek.

Dotazníkového šetření se zúčastnili zástupci pilotních škol přítomných na semináři GLOBE (6 dotázaných, 2 učitelé a 4 studenti ze škol SPŠP Zlín a ČAG České Budějovice). Dále se testování účastnilo Křesťanské gymnázium Praha 10 (15 dotázaných ze třetích ročníků, z toho 6 chlapců) pod vedením Mgr. Ivany Sýkorové a SPŠP Zlín (15 dotázaných z prvních ročníků, z toho 13 chlapců) pod vedením Mgr. Martiny Ledvinkové.

## 4. Výsledky

### 4.1. Modely

V rámci diplomové práce byly vytvořeny celkem 3 modely, které budou v následujících podkapitolách představeny: 1) *Vyvětrej si* zaměřený na pochopení vlivu CO<sub>2</sub> na zdraví člověka. Vzrůst koncentrace oxidu uhličitého v uzavřené místnosti je v modelu důsledkem dýchání člověka. 2) model vlivu oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy a 3) model vlivu obsahu dusíku v listech na rychlost fotosyntézy.

#### 4.1.1. Model *Vyvětrej si!*

Protože proces fotosyntézy je velmi komplexní a složitý jev a protože studenti nemají žádné zkušenosti s modelováním, natož s prací v softwaru Stella, bylo pro první seznámení s modelováním v softwaru Stella zvoleno téma, které je všem bližší a které nevyžaduje hlubší znalosti o tématu. Záměrně byl vytvořen velmi zjednodušený model s názvem *Vyvětrej si*, který modeluje vzrůst koncentrace oxidu uhličitého v místnosti v závislosti na čase. Téma působení oxidu uhličitého na zdraví člověka bylo vybráno také z motivačních důvodů, neboť v následujícím modelu fotosyntézy se student setká s vlivem koncentrace oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy. Bude tak moci porovnat, jakým způsobem stejné koncentrace oxidu uhličitého působí na člověka a na rostliny.

V modelu *Vyvětrej si* je hlavním faktorem, který působí na zvyšování oxidu uhličitého v místnosti, proces dýchání. Protože objem venkovního vzduchu, který bychom měli do místnosti přivést, abychom uchovali zákonem doporučenou kvalitu vzduchu interiéru, je mnohem větší než objem venkovního vzduchu, který bychom měli do místnosti přivést, abychom zachovali požadavky na koncentraci kyslíku, je zde při výpočtu objemu potřebného přiváděného venkovního vzduchu k udržení požadované kvality vzduchu faktor kyslíku zanedbán.

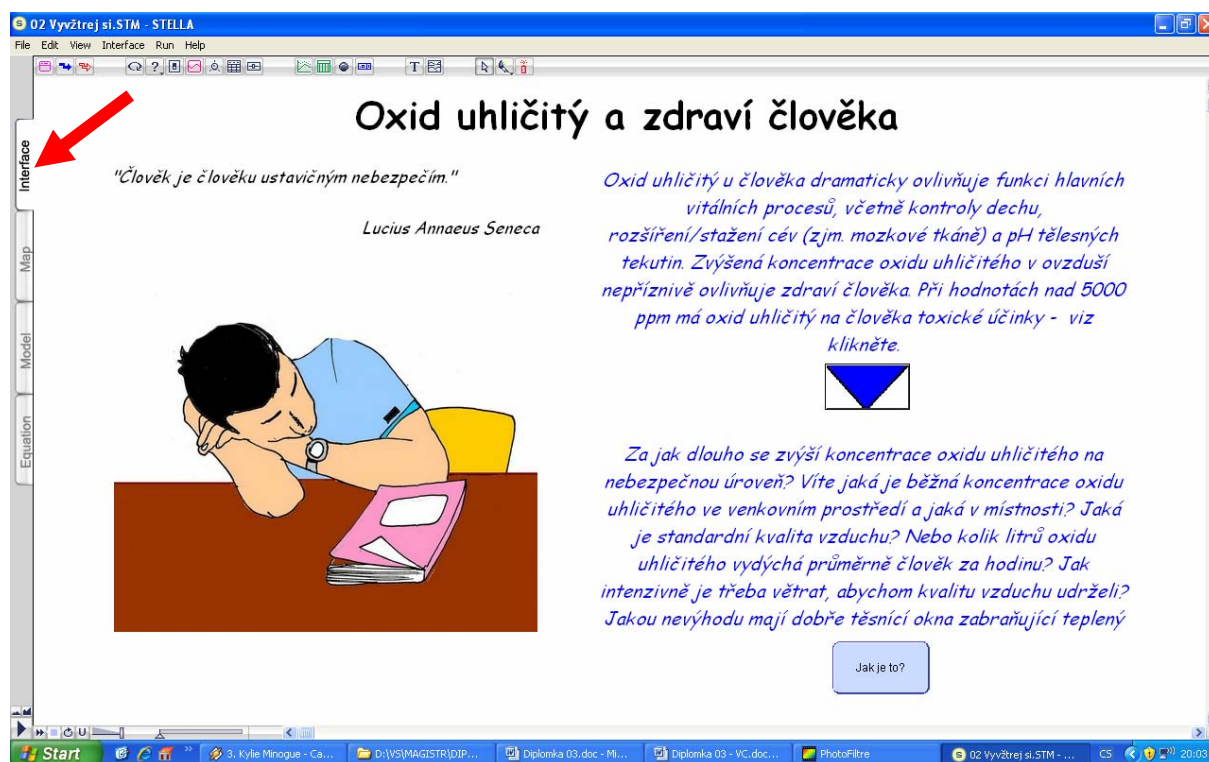
V modelové situaci se pohybujeme v obytné místnosti, kde můžeme dále zanedbat působení dalších plynů zhoršujících kvalitu ovzduší jako jsou oxidy síry, oxidy dusíku, oxid uhelnatý a formaldehyd, jež jsou produkovány zejména neodvětranými plynovými sporáky. V modelu dále předpokládáme, že je místnosti vybavena dokonale těsnícími okny, které neumožňují infiltraci oxidu uhličitého zvenku a nejsou zde žádné rostliny, které by fixovaly oxid uhličitý.

Cílem tohoto modelu je ukázat rozdíl mezi statickým a dynamickým pojetím modelu, osvojit si práci v softwaru Stella a základy modelování. Student je dále seznámen s vlivem koncentrace

oxidu uhličitého na zdraví člověka. Zároveň se dozví, jaká je běžná koncentrace oxidu uhličitého nejen v interiéru, ale také ve venkovním vzduchu.

Byly navrženy dvě verze, jak pracovat s modelem. V první verzi by studenti vytvářeli celý model samostatně podle instrukcí v pracovním listu. Protože nicméně volně stažitelný prohlížeč iSee Player toto neumožňuje a nebylo tak možno první verzi otestovat na školách (a také nelze předpokládat v nejbližší budoucnosti, že by si školy software Stella za cenu 1 899 USD pořídily) budu se dále zabývat pouze popisem druhé verze, kdy student pracuje s již vytvořeným modelem a využívá k dosažení stanovených cílů simulace modelu.

Po spuštění modelu se zobrazí úvodní režim, *Interface* (viz záložka vlevo, červená šipka). V této vrstvě je uživatel stručně uveden do tématu.



Okno 1

Pokud se bude chtít uživatel seznámit blíže s účinkem oxidu uhličitého na zdraví člověka, přejde k informačnímu panelu kliknutím na modrou šipku pod prvním odstavcem.

07 Vyztřej si STM - STELLA

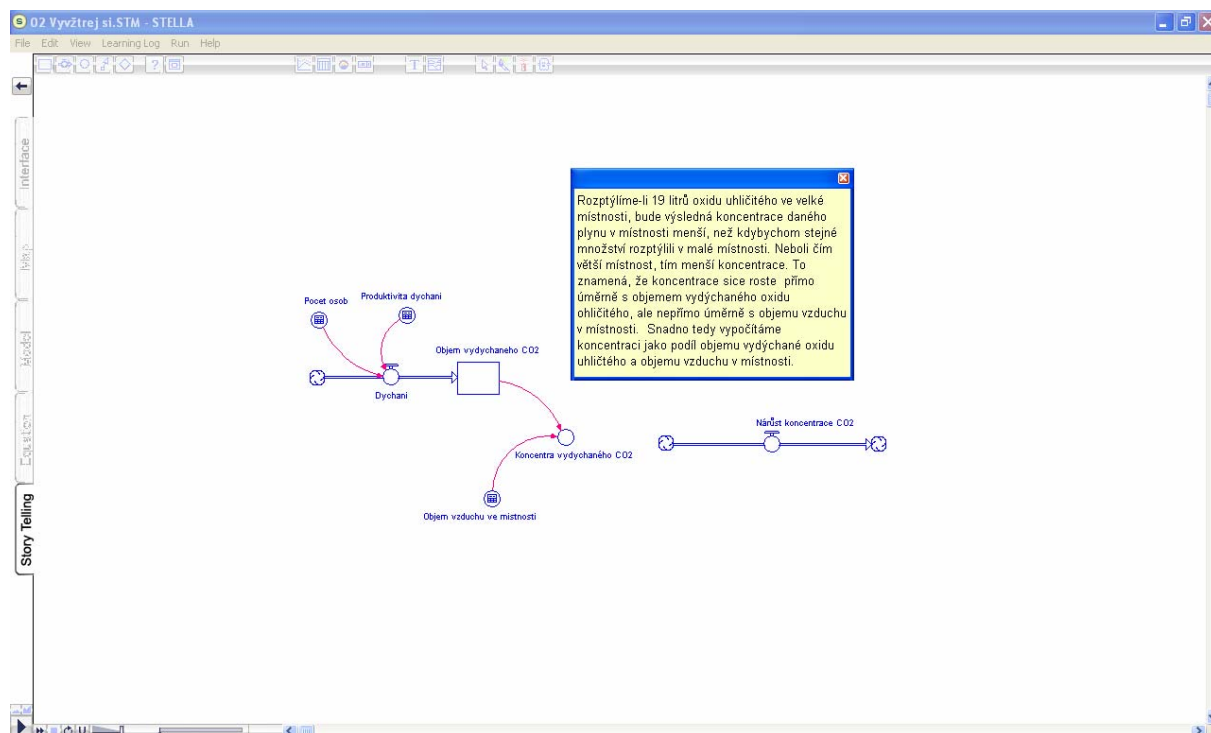
Účinek kvality ovzduší v interiéru na zdraví člověka

ppm	%	Příznaky	Doba expozice
1000 - 10 000	0.5 - 1	Fyziologická tolerance vůči této koncentraci	neomezená
20 000	2	Bolesti hlavy, dušnost při nízké námaze	Několik hodin
30 000	3	Mírná bolest hlavy, pocení a dušnost v klidu	1 hodina
40 000 - 60 000	4 - 5	Bolesti hlavy, závrať, zvýšený tepová tlak a nepřiměřená dušnost	Několik minut
60 000	6	Poruchy zraku a sluchu, bolesti hlavy, dušnost a ústa	Dostavení se postupně po minutách do hodiny
60 000 - 70 000	4 - 7	Bolesti hlavy, dechové srážky a slzota, zvýšený KT, dušnost nebo ústa	30 minut
70 000 - 100 000	7 - 10	(Bezvědomí), bolesti hlavy, zvýšená srdečního tepu, dechové srážky a slzota, krátký dech a pocení	1.5 - hodina
> 100 000 - 150 000	> 10 - 15	Závrať, nevolnost, bezvědomí, hrcozí hluboká srážka	1 - minuty
170 000 - 200 000	17 - 20	Bezvědomí, koma, křeče a smrt	1 minuta

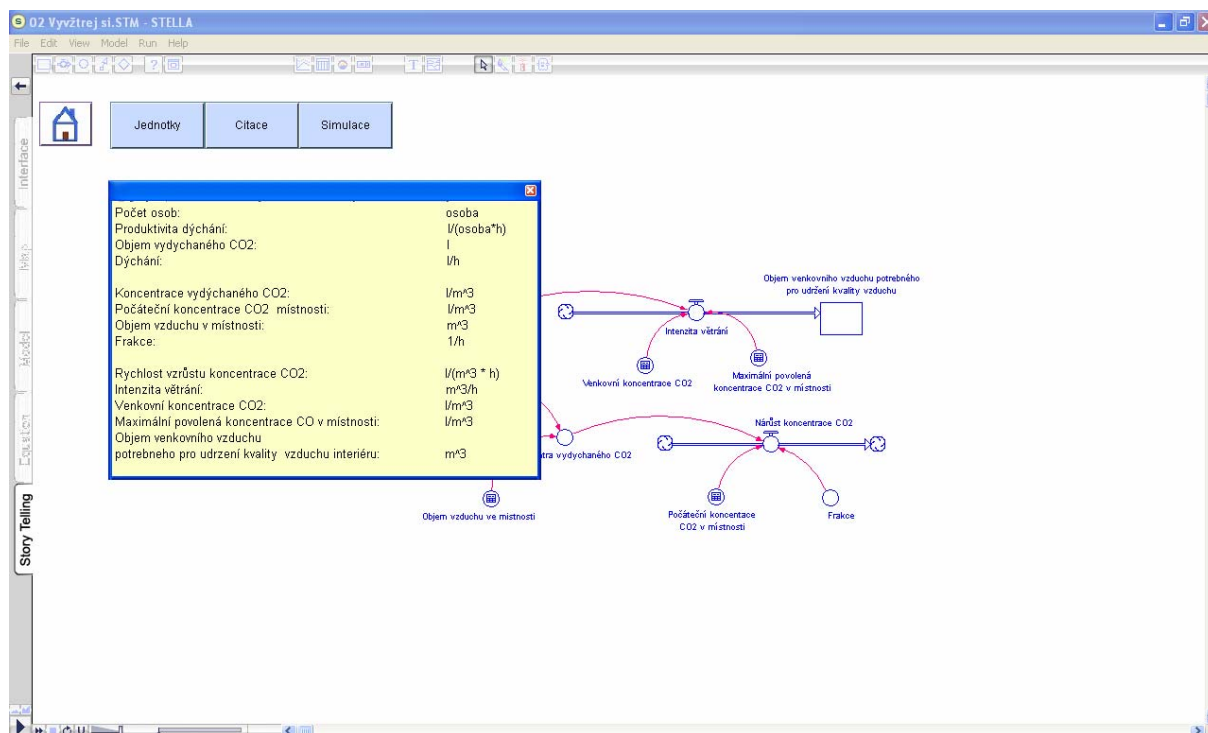
(BPA, 2000)

## Okno 2


Do režimu *Story Telling* lze přejít kliknutím na tlačítko *Jak je to?*. Režim *Story Telling* provádí uživatele procesem tvoření modelu pomocí textových bloků. Uživatel se v příběhu pohybuje pomocí tlačítka *Enter*. V této verzi softwaru *Stella 9.0.2*. u popisků diagramů toků, zásobníků a převaděčů nelze bohužel vedle dolních a horních indexů psát ani diakritická znaménka (např. ř, ý, ú).




## Okno 3



Okno 4

Po dokončení příběhu se zobrazí tlačítko *Domů*  umožňující návrat do úvodní vrstvy Interface, dále tlačítka *Jednotky*, *Citace* a *Simulace*. Jednou z nevýhod Stelly je (jak je vidět z tabulky jednotek) nemožnost psát v textových blocích dolní a horní indexy a dále nemožnost psát klasický znak pro operaci násobení. Jednotky jsou v tomto přehledně shrnuty v textovém bloku, neboť v prohlížeči isee Player nelze jednotky ve vrstvě *Model* nebo *Map* zobrazit.

Přechod k simulaci je umožněn tlačítkem *Simulace*. V této části uživatel plní úkoly uvedené vlevo na obrazovce. Úkoly může uživatel vyřešit výpočtem a ověřit simulací modelu. Pokud to úloha vyžaduje, lze měnit hodnoty parametrů v tabulce vpravo nahoře. Po nastavení parametrů nalezne uživatel odpověď na položené otázky v tabulce vpravo dole. Protože je v modelu uvedena koncentrace oxidu uhličitého v  $l \cdot m^{-3}$ , a tedy i v tabulkách jsou hodnoty uvedeny v těchto jednotkách je třeba výsledek převést na ppm. Návod na převod poskytuje tlačítko informace .

O2 Vyztřej si.STM - STELLA

File Edit View Interface Run Help

Interface

Map

Model

Equation

ÚKOLY:

- 1) O kolik se zvýší ppm v místnosti za jednu, dvě, tři... hodiny, je-li obsazena pouze jedním člověkem?
- 2) Za jak dlouho by se koncentrace oxidu uhličitého zvýšila nad maximální zákonem stanovenou hodnotu, pokud by se nevětralo a okna by byla dobře izolovaná?
- 3) Za jak dlouho se zvýší koncentrace oxidu uhličitého v dané místnosti na hodnotu, jež způsobí během minuty bezvědomí a smrt?
- 4) Kolik osob by muselo být v místnosti, aby se vyčerpal čerstvý vzduch již během jednoho dne?
- 5) Kolik m<sup>3</sup>/h venkovního vzduchu potřebujete, abyste udrželi kvalitu místnosti na 1000 ppm?

Klikněte na tlačítko VYMAŽ a pokračujte kliknutím na MODROU ŠÍPKU.

Změna hodnoty parametrů

Objem vzduchu ve místnosti	52
Počet osob	1
Počáteční koncentrace CO2 v místnosti	0,6
Produktivita dýchání	19
Maximální povolená koncentrace CO2 v místnosti	1,2
Venkovní koncentrace CO2	0,35

Vymazat

Time	Objem vydechaného CO2	Objem venkovního vzduchu potřebný	Nárůst koncentrace CO2

Okno 5

V druhé části práce uživatel s grafem a plní úlohy na základě čtení informací z grafu. Přesun do této části je možný pomocí modré šipky vlevo dole. Druhá část úloh slouží k ověřování hypotéz pomocí grafu.

O2 Vyztřej si.STM - STELLA

File Edit View Interface Run Help

Interface

Map

Model

Equation

ZNĚT

Změna hodnoty parametrů

Objem vzduchu ve místnosti	160
Počet osob	1
Počáteční koncentrace CO2 v místnosti	0,6
Produktivita dýchání	19
Maximální povolená koncentrace CO2 v místnosti	1,2
Venkovní koncentrace CO2	0,35

Vymazat

Time	Objem vydechaného CO2	Objem venkovního vzduchu potřebný	Nárůst koncentrace CO2
448	819531,00	101636,47	53,92
450	819560,00	101659,82	54,04
461	819589,00	101681,18	54,16
462	819589,00	101180,53	54,27
463	819607,00	101125,88	54,39
464	819626,00	101148,24	54,51
465	819645,00	101170,59	54,63
466	819664,00	101192,94	54,75
467	819683,00	101215,29	54,87
468	819702,00	101237,65	54,99
469	819721,00	101260,00	55,11
Final	819740,00	101282,35	

ÚKOLY

- 1) Rozhodněte, zda poroste koncentrace CO2 v místnosti rychleji v malé nebo velké místnosti. Svou hypotézu zdůvodněte a dokažte na grafu.
- 2) Jakým způsobem ovlivní počáteční koncentrace CO2 rychlost nárůstu koncentrace CO2 v místnosti? Svou hypotézu zdůvodněte a ověřte na grafu.

Nárůst koncentrace CO2: 1 - 2

Time: 0:00, 115:00, 230:00, 345:00, 460:00

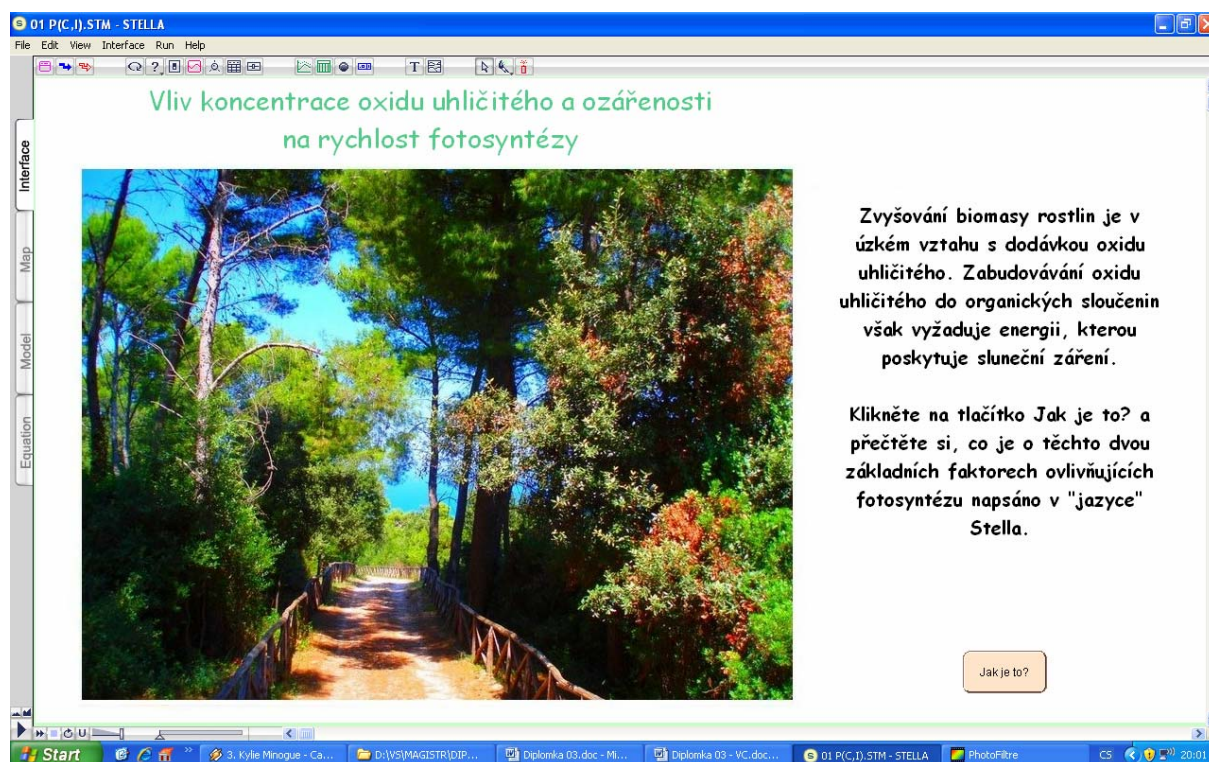
Page 1  
14:48 3. Zář 2010

Okno 6



## 4.1.2. Model fotosyntézy – oxid uhličitý a ozáření

Byly vytvořeny dvě verze modelu vlivu oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy.






Okno 7

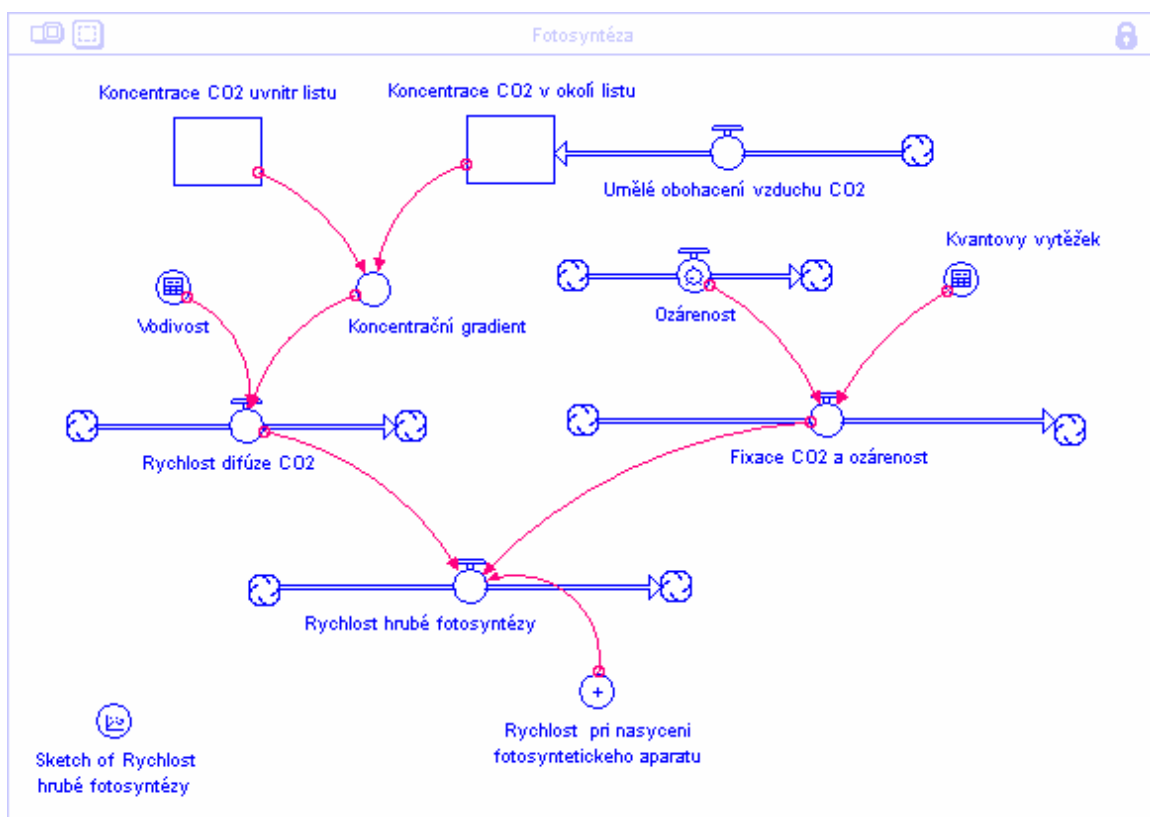
První model fotosyntézy **01 P(C,I)** demonstruje vliv koncentrace oxidu uhličitého na rychlost fotosyntézy při změně ozáření. Vztahy použité v modelu jsou převzaty od Thornley (1976) a Robert, Porter (2006). Hodnoty parametru jsou skutečné naměřené a jsou založené na více zdrojích. Parametry nezastupují žádný konkrétní druh nebo soubor dat – viz Tabulka 1.

Parametry	Označení	Hodnota parametrů	Jednotky	Zdroj
Koncentrace CO <sub>2</sub> v okolí listu	C <sub>a</sub>	0.1 – 0.65	g(C)·m <sup>-3</sup>	-
Koncentrace CO <sub>2</sub> uvnitř listu	C <sub>i</sub>	0.7 · C <sub>a</sub>	g(C)·m <sup>-3</sup>	Loreto (1992)
Ozáření	I	50 – 1000	J·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	-
Kvantový výtěžek	α	2,73 · 10 <sup>-6</sup> – 8.5 · 10 <sup>-6</sup>	g(C) · J <sup>-1</sup>	-
Vodivost pro CO <sub>2</sub>	τ	0.002 – 0.009	m·s <sup>-1</sup>	Nobel (2009)

Tabulka 1 Hodnoty parametrů použité v modelu fotosyntézy **01 P(C, I)**

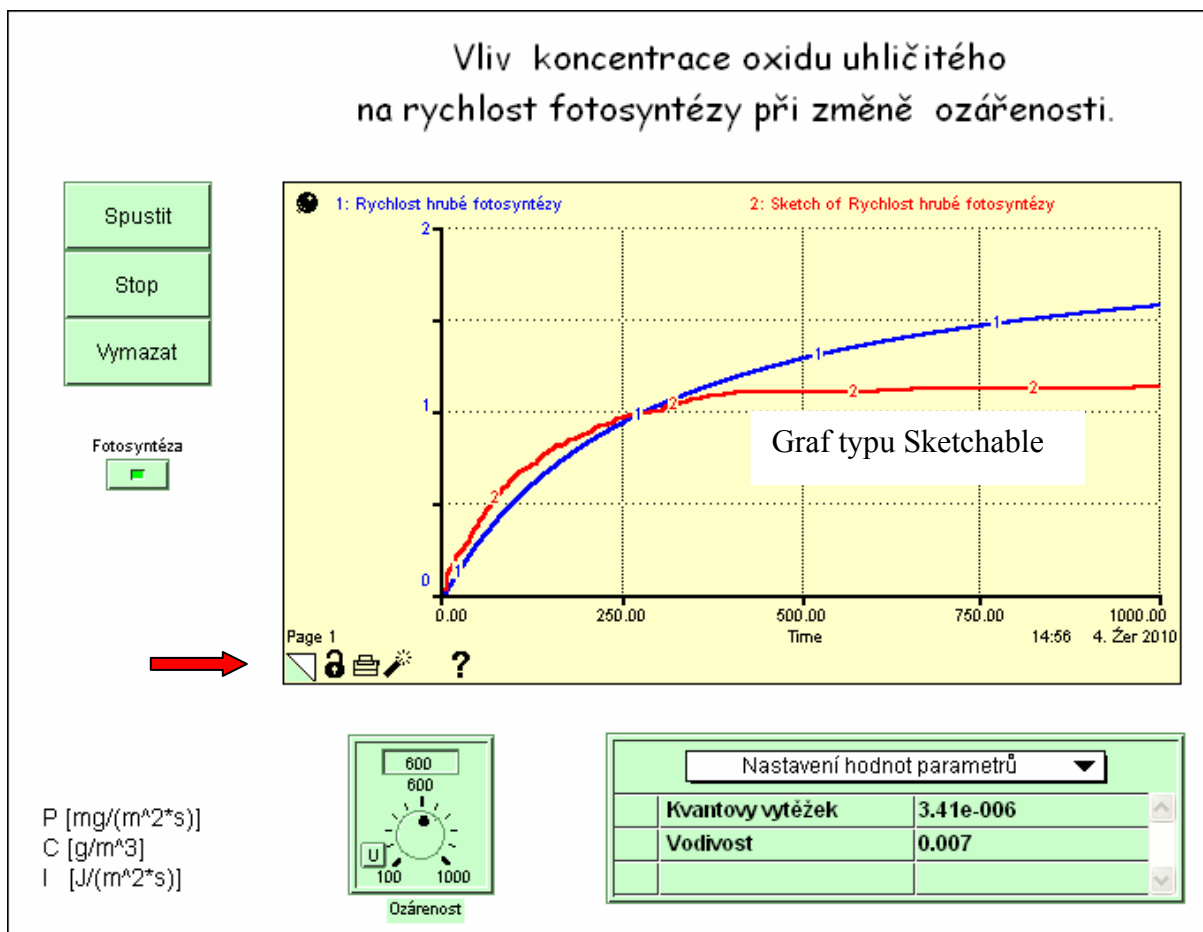
Model zachycuje strukturu uvnitř systému a pomáhá vytvořit představu, jakými mechanismy faktory – oxidem uhličitým a ozáření – rychlost fotosyntézy ovlivňují. Struktura modelu je

uživateli přiblížena pomocí diagramů zásobníků (akumulací) , toků (procesů)  a převaděčů .



**Okno 8**

Další přiblížení tématu se uskutečňuje pomocí grafu. V prvním kroku na *Page 1* uživatel pracuje s grafem typu *Sketchable*. Uživatel má možnost vyjádřit hypotézu, jakým způsobem ovlivňuje oxid uhličitý rychlost hrubé fotosyntézy, tuto hypotézu graficky vyjádřit (červený graf) a svou hypotézu ověřit simulací (modrý graf) – viz Okno 9.



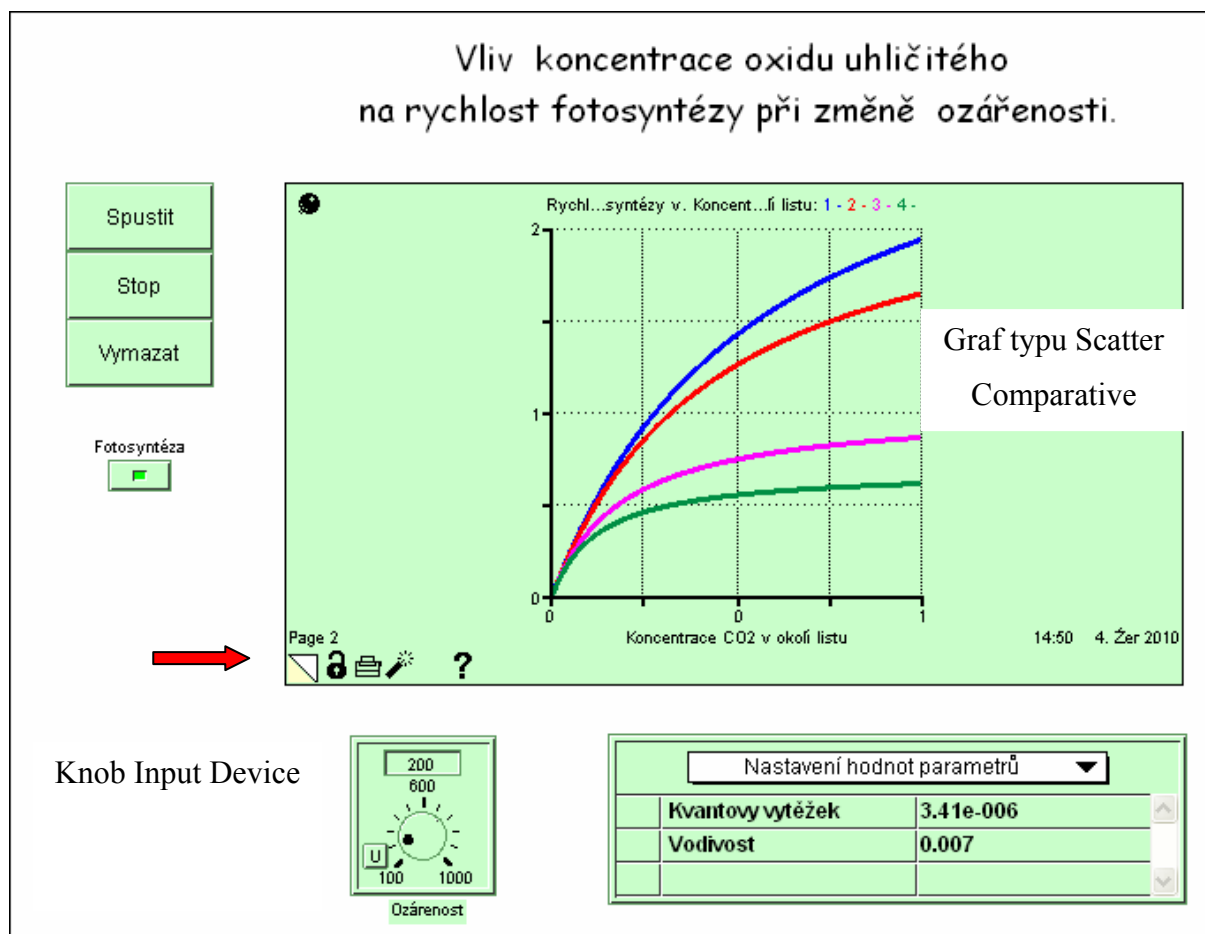
#### Okno 9 Graf typu Sketchable

V dalším kroku na *Page 2* uživatel pracuje s typem grafu *Scatter Comparative*, který umožňuje zachovat výsledky několika simulací pro různé hodnoty ozáření. Hodnotu ozáření lze měnit pomocí otočného knoflíku *Knob Input Device* v rozsahu 10 – 1000 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Okno 10 zobrazuje grafy pro nastavené hodnoty ozáření 900, 700, 300 a 200 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> (modrá, červená, růžová a zelená barva).

Model umožňuje simulovat také vliv ozáření na rychlost fotosyntézy při změně koncentrace oxidu uhličitého. Při práci v softwaru Stella postačí, pokud změním nastavení hodnot parametrů v režimu *Model*. Při práci v prohlížeči *Isee Player* změna nastavení není možná, proto musí uživatel pracovat s druhou verzí modelu **01 P(I,C)**, kde je toto nastavení již provedeno – hodnota koncentrace oxidu uhličitého v okolí listu na konstantní hodnotu, zatímco ozáření nabývá hodnot z intervalu <0; 1500>.

Postup práce v modelu fotosyntézy je tentýž jako v modelu *Vyvětrej si*. Uživatel pomocí tlačítka *Jak je to?* přejde do režimu *Story Telling*, kdy se na závěr zobrazí tlačítko *Simulace*. Úkoly nalevo v textovém bloku provádějí uživatele při práci s modelem. Jsou pouze námětem pro práci s modelem – uživatel může klást vlastní otázky a testovat model. Nevýhodou ovšem

je, že prohlížeč neumožňuje jiné nastavení minimálních a maximálních hodnot parametrů, než které provedl autor.



Okno 10 Graf typu Scatter Comparative

#### 4.1.3. Model fotosyntézy – dusík

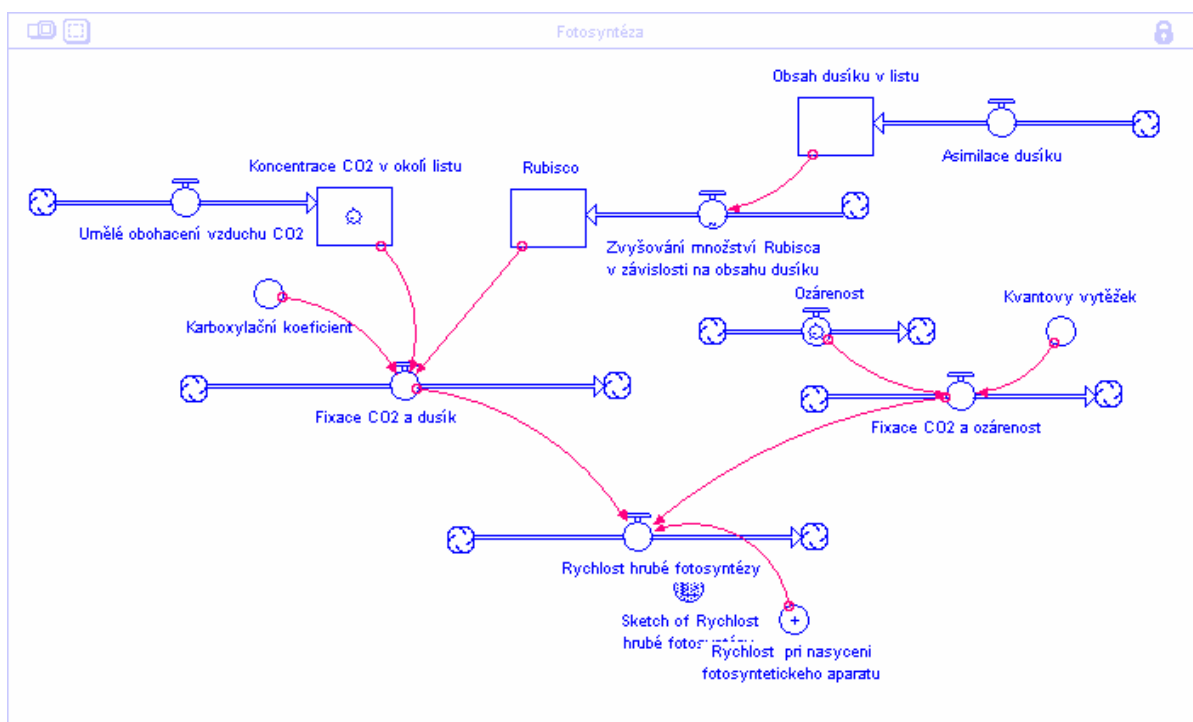
Druhý model fotosyntézy  $02 P(N, C, I)$  demonstruje vliv obsahu dusíku v listu na rychlost fotosyntézy při změně koncentrace oxidu uhličitého a ozáření. Vzhledem k tomu, že se při prezentaci modelů na semináři GLOBE ukázal model fotosyntézy  $01 P(C, I)$  pro studenty jako obtížný, nebyl model  $02 P(N, C, I)$  zahrnut do dalšího testování. Přesto zde v krátkosti model představím.

Vztahy použité v modelu jsou převzaty od Dewar (1996) a Leegood a kol. (2000). Hodnoty parametru jsou skutečné naměřené a jsou založené na více zdrojích. Parametry nezastupují žádný konkrétní druh nebo soubor dat – viz Tabulka 2.

Parametry	Hodnota parametrů	Jednotky	Zdroj
Koncentrace CO <sub>2</sub> v okolí listu	0.1 – 0.65	g(C)·m <sup>-3</sup>	-
Karboxylační koeficient	1.27·10 <sup>-3</sup>	m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	Dewar (1996)
Obsah dusíku v listu	1.68 – 3.64	g·m <sup>-2</sup>	Sage (1987)
Obsah Rubisca v listu	1,32	g·m <sup>-2</sup>	Leegood (2000)
Ozářenost	50 – 1000	J·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	-
Kvantový výtěžek	2,73 ·10 <sup>-6</sup> – 8.5 ·10 <sup>-6</sup>	g(C) ·J <sup>-1</sup>	-
Maximální rychlost fotosyntézy při saturaci světlem	0.0026 – 0.0092	g·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Ellsworth (2004)

Tabulka 2 Hodnoty parametrů použité v modelu fotosyntézy 02 P(N, C, I)

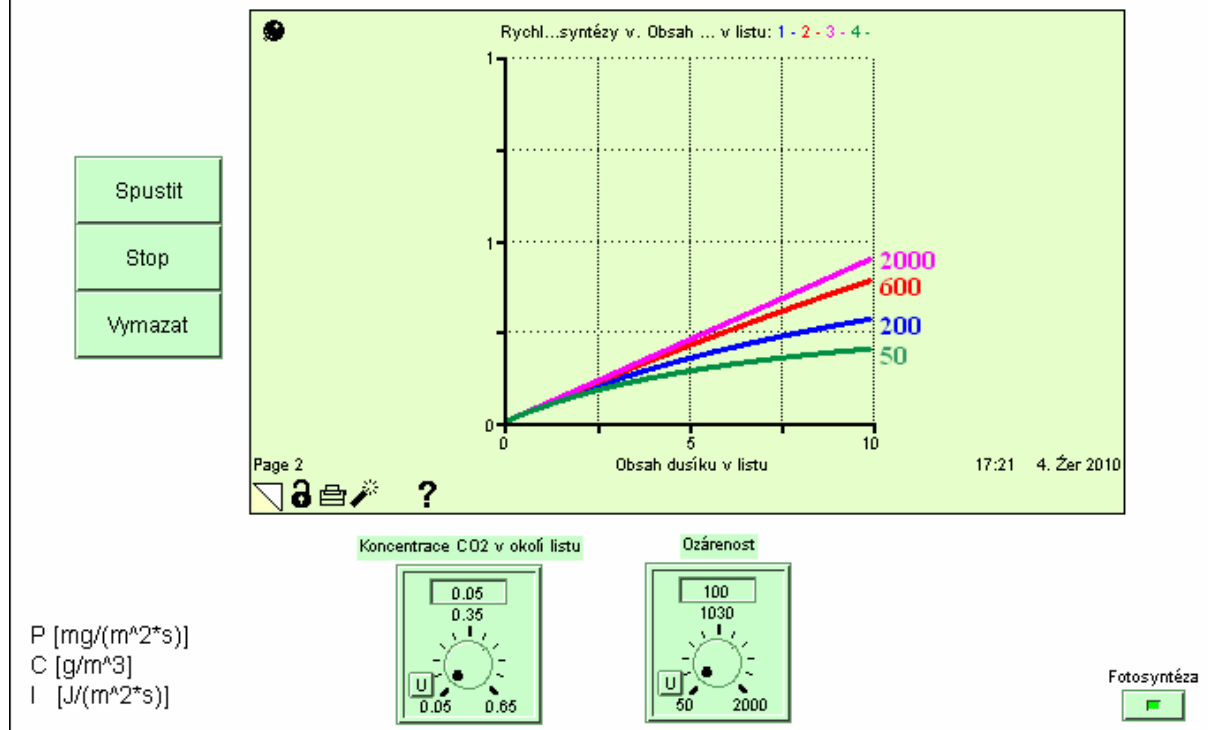
Podobně jako u prvního modelu fotosyntézy má uživatel možnost se seznámit se strukturou systému v režimu Story Telling s doprovodem textových bloků nebo přechodem do vrstvy Model bez připojeného komentáře.



Okno 11

Ve vrstvě Interface je možná simulace modelu. Hodnoty parametrů, koncentrace oxidu uhličitého a ozáření, lze měnit pomocí otočných knoflíků Knof Input Device.

## Vliv obsahu DUSÍKU v listu na rychlost hrubé fotosyntézy.



Okno 12

### 4.2. Pracovní listy a metodické manuály

Pro ulehčení práce s modely byly vypracovány pracovní listy pro studenty a metodické manuály pro učitele – viz příloha 9.1 a 9.2.

## 9. Příloha

### 9.1. Pracovní listy pro studenty

- 9.1.1. [Pracovní list 01 – Ppm](#)
- 9.1.2. [Pracovní list 02 – Vyvětrej si](#)
- 9.1.3. [Pracovní list 03 – Cesta do hlubin](#)
- 9.1.4. [Pracovní list 04 – Ozáření a oxid uhličitý](#)

### 9.2. Metodické manuály pro učitele

- 9.2.1. [Metodický manuál 01 – Ppm](#)
- 9.2.2. [Metodický manuál 02 – Vyvětrej si](#)
- 9.2.3. [Metodický manuál 03 – Cesta do hlubin](#)
- 9.2.4. [Metodický manuál 04 – Oxid uhličitý a ozáření](#)

Protože se v modelech pracuje s jednotkami ppm, byl vytvořen speciálně pracovní list *Ppm* – viz příloha 9.1.1., který se skládá ze dvou komplexních úloh. První úloha obsahuje 5 otevřených otázek, které studenti řeší na základě práce s textem. Druhá úloha obsahuje 6 otevřených otázek, při kterých student pracuje s analogiemi. Pracovní list *Ppm* je doplněn o nepovinnou část, ve které studenti převádějí jednotky ppm na jednotky  $\text{mg}\cdot\text{m}^3$ , se kterými se v modelech často pracuje. Pro zájemce byl pak pro tyto účely též vytvořen program na převádění jednotek – viz kapitola 3.4.

Jako podpora pro práci s modelem *Vyvětrej si!* byl vytvořen pracovní list *Vyvětrej si!* – viz příloha 9.1.2. V úvodu jsou studenti prostřednictvím textu seznámeni s vlivem oxidu uhličitého na zdraví člověka a s hodnotami parametrů, které se v modelu používají. První úloha směřuje k pochopení struktury modelu a vede studenty k matematickému popisu vztahů. Druhá úloha se zaměřuje na simulaci a čtení informací z tabulky. Obsahuje 5 otevřených otázek. Třetí úloha se zaměřuje na simulaci a čtení informací z grafu. Obsahuje 4 otevřené otázky.

Jako úvod pro práci s modelem fotosyntézy byl vytvořen doplňkový pracovní list *Cesta do hlubin* – viz příloha 9.1.3, který obsahuje tři úlohy a slouží k zopakování stavby listu, rostlinné buňky a chloroplastu. Cílem je též připomenout si, kde proces fotosyntézy probíhá. První úloha se zaměřuje na stavbu listu rostliny a funkci jejích částí. Obsahuje popis obrázku a jednu otevřenou doplňovací otázku. Druhá úloha se zaměřuje na stavbu rostlinné buňky a funkci jednotlivých organel. Obsahuje popis obrázku a jednu uzavřenou přiřazovací otázku. Třetí úloha se zaměřuje na popis chloroplastu a funkci jeho částí. Obsahuje popis obrázku a křížovku, jejíž vyplnění vyžaduje komunikaci s textem.

Pro samotnou práci s modelem fotosyntézy byl vytvořen pracovní list *Ozářenost a oxid uhličitý*, který se skládá ze tří komplexních úloh – viz příloha 9.1.4. V úvodu je student prostřednictvím textu seznámen s pojmy a hodnotami použitými v modelu. První úloha je určena pro pochopení struktury modelu. Druhá úloha je zaměřena na simulaci, při které je sledována závislost rychlosti fotosyntézy na koncentraci oxidu uhličitého, a je členěna na dvě části – každá s třemi otevřenými otázkami. V první části je zkoumána závislost při změně ozáření a ve druhé části při změně vodivosti průduchů. Třetí úloha je opět zaměřena na simulaci, při které je sledována závislost rychlosti fotosyntézy na ozáření. Tato úloha je členěna na tři části s třemi otevřenými otázkami. V první části je zkoumána závislost při změně koncentrace oxidu uhličitého a v druhé části při změně hodnoty kvantového výtěžku. Třetí část se zabývá interpretací grafu. Obsahuje čtyři otevřené otázky.

Ke každému pracovnímu listu byl vypracován metodický manuál pro učitele – viz příloha 9.2. Každý manuál obsahuje cíl, očekávané výstupy, doporučený postup práce s pracovním listem, předpokládanou časovou náročnost, potřebné pomůcky, seznam použité literatury a řešení úloh.

### **4.3. Podpůrné materiály**

#### **4.3.1. Cvičení k prezentaci do úvodu modelování**

Jelikož práce s modely není běžnou aktivitou ve výuce biologie a protože modely byly vytvořeny v softwaru Stella, se kterým se studenti dosud nesešli, bylo třeba studenty na práci s modely připravit. Pro tyto účely byla vytvořena prezentace uvádějící studenty do problematiky tvorby modelu softwaru Stella, která je zaměřená na osvojení „jazyka“ Stelly a na rozvoj schopnosti v tomto jazyce „číst“ a „psát“. K prezentaci se úzce vážou cvičení, na kterých si studenti ověří, zda-li problematice porozuměli – viz příloha 9.3. Učitelům je určena verze s řešením daných cvičení – viz příloha 9.4. Cvičení jsou rozdělena na dvě části. První část se zabývá základními stavebními prvky jazyku Stella a „gramatickými pravidly“. Druhá část se zabývá pěti obecnými modely, které se často objevují v komplexních systémech. Poslední úloha druhé části je věnována objevování obecných modelů v modelu vlivu obsahu dusíku v listech na rychlost fotosyntézy.

Podpůrné materiály vytvořené v Microsoft Visual Studio 2008 (*Ppm konvertor* a *Program na výpočet kvantového výtěžku* – viz kapitola 0) nejsou nezbytnou součástí práce s modely. Byly vytvořeny pro zájemce, kteří by chtěli hlouběji pochopit vztahy uvnitř modelu.

#### **4.3.2. Ppm konvertor**

Koncentrace oxidu uhličitého se často uvádí v jednotkách ppm. Z praktických důvodů se nicméně používají jednotky  $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{mol}^{-1}$  nebo  $\text{mg}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-3}$ . V modelu fotosyntézy jsou použity jednotky  $\text{g}(\text{C})\cdot\text{m}^{-3}$ . Aby uživatel, který je navyklý pracovat s jednotkami ppm, dokázal porovnat, jaké hodnoty přibližně odpovídají např. 350, 750 nebo 1000 ppm, převedeme-li je na  $\text{g}(\text{C})\cdot\text{m}^{-3}$ , byl vytvořen program pro převod jednotek z ppm na  $\text{mg}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-3}$  a opačně, dále z  $\text{mg}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-3}$  na  $\text{mg}(\text{C})\cdot\text{m}^{-3}$  a obráceně. Protože na středních školách se studenti s jednotkami ppm nesešli, byl vytvořen pracovní list, který je s jednotkami ppm seznámí a ověří pochopení nové látky na řadě cvičení s analogiemi.

Program není nezbytnou součástí podpůrných materiálů práce s modely. Slouží pouze jako doplněk pro zájemce.





**Obr. 13 Ppm konvertor – program na převod jednotek**

Po spuštění programu se objeví okno umožňující zadávat hodnoty nutné pro provedení převodu – viz Obr. 13. Pokud uživatel nezadá hodnotu parametru, který je pro převod nezbytný, je upozorněn informačním oknem, že je třeba vyplnit příslušnou kolonku. Hodnoty

parametrů se musí zadávat v přednastaveném formátu. Pomocí tlačítka vpravo nahoře lze přejít k panelu, který popisuje způsob převodu jednotek.



#### **4.3.3. Program na výpočet kvantového výtěžku**

Jedním z parametrů v modelu fotosyntézy je kvantový výtěžek – poměr fotosyntetického produktu, asimilovaného CO<sub>2</sub>, a počtu absorbovaných světelných kvant. Po spuštění programu se objeví okno umožňující výpočet hodnoty kvantového výtěžku (v různých jednotkách) na základě zadaného počtu molů fotonů nutných pro asimilaci jednoho molu oxidu uhličitého – viz Obr. 14.

**Kvantový výtěžek**

**Zadávání hodnot parametrů**

Vlnová délka záření,[nm] :

Počet molů fotonů potřebných k asimilaci 1 molu molekul CO<sub>2</sub>:

8 molů fotonů

10 molů fotonů

Jiný počet

Energie 1 molu fotonu	175,9	[kJ/mol]
<input type="button" value="Vypočti"/>		
Kvantový výtěžek 1	0,125	[mol(CO <sub>2</sub> )/mol(energie)]
<input type="button" value="Vypočti"/>		
Kvantový výtěžek 2	0,031	[g(CO <sub>2</sub> )/kJ(energie)]
<input type="button" value="Vypočti"/>		
Kvantový výtěžek 3	0,00853	[g(C)/kJ(energie)]
<input type="button" value="Vypočti"/>		
Maximální energetická účinnost	33	[%]
<input type="button" value="Vypočti"/>		

Obr. 14 Kvantový výtěžek – program na výpočet hodnoty kvantového výtěžku

## **4.4. Presentace a ověření modelů a výukových materiálů**

### **4.4.1. Presentace na seminářích GLOBE**

První představení modelu vytvořeného v softwaru Stella proběhlo na semináři GLOBE ve dnech 4 – 5.4. 2008. Další modely byly představeny 11.-12.6. 2010. Samotné práci s modely předcházela teoretický úvod do matematického modelování, jeho význam a možnosti ve výuce. Učitelé a studenti byli seznámeni s prací v softwaru Stella – se základními stavebními prvky Stelly, s „gramatickými pravidly“, způsobem propojování jednotlivých prvků a obecnými modely. Presentace byla doplněna cvičeními pro snazší osvojení nově nabytých znalostí.

V rámci teoretické přípravy se studenti během práce s pracovními listy seznámili s jednotkami ppm, které jsou používány v modelech, a dále si zopakovali základní znalosti o stavbě listu, buňky a chloroplastu rostliny. Samotná práce s modely se realizovala na PC s instalovaným volně stažitelným prohlížečem iSee Player.

Na semináři GLOBE byly předány veškeré materiály k otestování na pilotních středních školách. Učitelé obdrželi metodické manuály, pracovní listy pro studenty a CD s programy, které je třeba nainstalovat.

### **4.4.2. Dotazníkové šetření**

Dotazníkového šetření se zúčastnili zástupci pilotních škol přítomných na semináři GLOBE. Dále se testování účastnilo Křesťanské gymnázium Praha 10 a SPŠP Zlín. Z časových důvodů nebylo možno na Křesťanském gymnáziu ověřit všechny materiály, a proto byly dotazníky v některých případech vyplněny jen částečně. Dotazník se obsahoval následující položky (viz příloha 9.5):

- 1) *Úvod do modelování v softwaru Stella* – položka zjišťující, zda úvodní presentace seznamující studenty s modelováním v softwaru Stella poskytla dostatečný podklad pro efektivní práci s modely.
- 2) *Hodnocení srozumitelnosti teorie pracovních listů*
- 3) *Pracovní list Ppm* – dvě položky: jednak na hodnocení pracovního listu známkou, jednak otevřená položka umožňující vyjádřit vlastní mínění, napsat připomínky nebo doporučení.
- 4) *Pracovní list Cesta do hlubin* - dvě položky: jednak na hodnocení pracovního listu známkou, jednak otevřená položka umožňující vyjádřit vlastní mínění, napsat připomínky nebo doporučení.

- 5) *Práce s modely* – položky druhé části dotazník: (a) co studenty na práci s modely zaujalo, (b) zda modely přispěly k pochopení fotosyntézy, (c) co se studenti prostřednictvím modelu naučili, (d) co studentům stěžilo práci s modely, (e) jaké další materiály by jim práci s modely ulehčily.

Vyhodnocení dotazníků potvrdilo očekávané výsledky a poskytlo podněty pro přepracování pracovních listů.

### **Úvod do modelování v softwaru Stella**

Při úvodní prezentaci seznamující studenty se základy modelování v softwaru Stella jsem se setkala s dobrou spoluprací ze strany studentů a učitelů, ačkoli po vyhodnocení se ukázalo, že by bylo třeba věnovat problematice více času a zařadit více příkladů k procvičení. Z testování materiálů na škole SPŠP Zlín vyplynulo, že právě tato část materiálů je považována za nejobtížnější a byly opět vzneseny požadavky po více příkladech a větší časové dotaci na zvládnutí problematiky. S tímto požadavkem samozřejmě naprosto souhlasím.

### **Hodnocení srozumitelnosti teorie pracovních listů**

Teoretická část pracovních listů byla hodnocena jako srozumitelná a dle studentů poskytovala dostatek informací pro práci s modely. Tento názor zastávali převážně ti studenti, kteří mají velmi pozitivní vztah k počítačům nebo matematice, fyzice. V ostatních případech se vyskytla téměř bez výjimky potřeba po více příkladech, větším zjednodušení. V případě studentů průmyslové školy z pochopitelných důvodů byl vznesen požadavek také po omezení odborných biologických termínů. Často se objevila stížnost na nedostatek času.

### **Pracovní list Ppm**

Pracovní list *Ppm* představující pouze doplňující materiál, který seznamuje studenty s jednotkami, jež jsou v dalších aktivitách používány, byl přijat velmi pozitivně. Výběr příkladů a otázek byl považován za vhodně zvolený a zábavný. Až na výjimky úkoly nečinily studentům potíže. Pracovní list byl hodnocen např. slovy „*srozumitelné, dobré, prima, bavilo mě to, zajímavé, něco nového jsem se dozvěděla*“.

### **Pracovní list Cesta do hlubin**

Podobně jako pracovní list *Ppm*, také pracovní list *Cesta do hlubin* představuje pouze doplňkový materiál, který byl vytvořen za účelem vytvoření představy, kde se proces fotosyntézy odehrává – přitom jde o přechod od globálního pohledu na rostlinu po postupné pronikání do menších a menších částí až po mikroskopickou úroveň. Nejprve si tak studenti

zopakují stavbu listu, poté buňky a následně chloroplastu. Studenty gymnázia byl hodnocen tento pracovní list vůbec nejpozitivněji – ocenili zejména hezké, barevné a přehledné obrázky, dále celkovou srozumitelnost, přehlednost a dobrou strukturovanost pracovního listu. Někteří studenti vyjádřili přání setkávat se s takovýmto typem úloh častěji. Jako obtížnější byla hodnocena část s přiřazováním, s čímž se víceméně počítalo a bude třeba tuto část přepracovat. Další úskalí představovala křížovka, která byla některými hodnocena jako zábavná a zajímavá, ale na druhé straně také jako obtížná. Další úpravy budou též nutné v textu přejatém z časopisu *Vesmír*, se kterým studenti pracovali, neboť byl pro studenty obtížný, málo srozumitelný a špatně čtivý (nebo téměř nečitvý).

Vzhledem k faktu, že se na škole SPŠP Zlín biologie prakticky neučí, se tento pracovní list nesetkal s tak pozitivním ohlasem, neboť studentům chybí potřebné znalosti a shledali úkoly za příliš obtížné. O to více si cením takových poznámek, ve kterých studenti vyjádřili, že pracovní list byl zajímavý, konečně se o tématu něco dozvěděli a že bylo téma dobře vysvětleno.

### **Zhodnocení obecné charakteristiky práce s modely**

Co se týče samotné práce s modely, byla hodnocena obecně jako obtížná. Pouze studenti, kteří mají velmi kladný vztah k počítačům, matematice a fyzice, vykazovali také mnohem pozitivnější dojmy z práce s modely. Za obtížnější byl považován model fotosyntézy, kde téměř bez výjimky studenti poznamenali, že byla práce ztížena nedostatkem informací o tématu (fotosyntéze), neznalostí některých pojmů, nedostatkem informací o modelování a nejistotou při samotné práci se Stellou. Z těchto, pochopitelných, důvodů byla vyslovena potřeba po dalších doplňujících materiálech, jako jsou prezentace týkající se výkladu faktorů ovlivňujících fotosyntézu, výkladu práce se softwarem Stella a více obrazových materiálů.

Jak jsem již naznačila, práce s modelem byla obecně považována za obtížnou. Studenti, kteří hodnotili svůj vztah k počítačům známkou 1, zpravidla neměli problémy s prací s modely, považovali ji za zábavnou a přínosnou. Studenti, kteří ohodnotili svůj vztah k počítačům známkou 4 – 5 nebo jejichž oblíbeným předmětem byla např. tělesná výchova, považovali modely a práci s nimi až za nesrozumitelnou. Práce na PC byla v těchto případech pro studenta špatně přehledná po grafické stránce a obtížná na přemýšlení. Na jedné straně tak stálo hodnocení „skvělé“ nebo „v pohodě“ a na druhé straně pak „absolutně ničemu jsem nerozuměl“. Toto extrémní hodnocení však nebylo většinově zastoupené.

Ukázalo se, že studenti mají potíže, pokud mají informace zaznamenávat do tabulky nebo hodnoty z tabulek vyčíst. Problém se ukázal též u čtení informací z grafu, pokud studenti měli špatné základy z analytické geometrie. Důraz by se dále měl klást na zdůraznění významu a smyslu práce s modelem a jeho opodstatnění, neboť řada studentů (přestože opět většinou z řad těch, jež nemají kladný vztah k matematice nebo počítačům) smysl postrádala.

### **Pracovní list a model vliv ozářenosti na rychlost fotosyntézy**

Tento model nebyl otestován na Křesťanském gymnáziu. Při představení modelu fotosyntézy na semináři GLOBE byly úkoly, oproti modelu Vyvětrej si, vnímány jako složité. Vzhledem k výsledkům, které vyplynuly ze semináře, a vzhledem k tomu, že se na průmyslové škole biologie nevyučuje, by se dalo očekávat, že se model fotosyntézy nesetká s velkou oblibou. Překvapením bylo, že studenty práce s modelem fotosyntézy bavila i přes tento handicap. Přesto vesměs přiznali, že teorie je mimo jejich možnosti a téma fotosyntézy je příliš nezajímá.

### **Vyhodnocení dotazníků**

Vzhledem k tomu, že se šetření účastnilo 34 studentů a 3 učitelé a že studenti neměli pro práci dostatek času (jak sami uvedli), nemají výsledky statistickou hodnotu a lze je považovat pouze za orientační. Přesto výsledky naznačují určitý trend, který byl víceméně očekáván.

Přes veškeré obtíže, které práce s modely skýtala, učitelé i studenti hodnotili modely jako zajímavé a poznamenali, že díky modelu si uvědomili význam matematiky, provázanost vědních oborů, získali nové informace o fotosyntéze a ujasnili si vztahy uvnitř systému. Řadu studentů zaujala práce s grafy, možnost měnit hodnoty, názornost vyjádření mechanismů ovlivňujících fotosyntézu a také možnost pomocí modelů vyjádřit různé děje. Řada studentů poznamenala, že model pomohl k lepšímu pochopení fotosyntézy.

Při hodnocení byl nejlépe oznámkován pracovní list ppm, dále pracovní list pro model vyvětrej si a ozářenosti. Celkem pozitivněji byly modely přijaty na průmyslové škole SPŠP Zlín než na Křesťanském gymnáziu. Na Křesťanském gymnáziu měl největší úspěch pracovní list Cesta do hlubin. Dotazníkové šetření na pilotních školách pouze ukázalo určitý trend, který nicméně potvrdilo očekávané výsledky. Vzhledem k tomu, že modelování nejen ve výuce biologie, ale ve výuce obecně je teprve v zárodcích, považují výsledky ověřování materiálů za úspěšné. Je však třeba zařadit řady dalších aktivit, jež by se staly nedílnou součástí vyučování, které by vyžadovaly mnohem větší časovou dotaci, než jakou současné nastavení školního systému umožňuje.

## **5. Diskuze**

### **5.1. Biologii rostlin**

#### **Systémový přístup v biologii rostlin**

Biologie rostlin má potenciál poskytnout alespoň částečné řešení k řadě problémů 21. století jako jsou vzrůstající koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší, vyčerpání zásob ropy, nedostatek pitné vody nebo vzrůstající nedostatek dostupných potravin. Vzhledem k vzrůstající populaci bude v tomto století třeba více jak zdvojnásobit produkci obilí (Long 2010). K pokrytí požadavku na rostliny jako zdroje potravy i jako zdroje alternativního paliva je třeba dosáhnout vyšších výnosů. Pro dosažení tohoto cíle je nutné porozumět fungování rostlin na molekulární, buněčné i orgánové úrovni. Vyrůstá potřeba po integraci znalostí ze všech těchto úrovní, tj. vyrůstá potřeba po systémovém porozumění rostlinám (Minorsky 2003). Navzdory využívání principů systémové dynamiky po desítky let, však stále modely výnosu plodin obsahují mnoho empirických elementů a parametry v modelu mají jen malý biologický význam (Yin 2010). Wolkenhauer (2005) ve svém článku dále propaguje matematické modelování a simulaci jako součást molekulární a buněčné biologie. Dle autora mohou být funkce buňky jako jsou růst, diferenciaci, dělení a apoptóza pochopeny pouze tehdy, pokud je chápeme jako dynamické systémy.

### **5.2. Matematické modelování a modely ve výuce**

#### **Trendy ve výuce**

Reformní hnutí ve vzdělání v posledních 20 letech zaznamenává posun ve vzdělávacích cílech – odklon od vytváření znalostí založených na vědeckých faktech k rozvoji hlubšího porozumění hlavních konceptů v rámci každé vědecké disciplíny. Mnoho literatury se zabývá u studentů výzkumem konceptů života, rostlin a živočichů. Teprve v 80. a 90. letech 20. století se badatelé zaměřili na výzkum dalších konceptů – např. koncept buněčné respirace, fotosyntézy, buněčného dělení, transkripce, translace apod. Ukázalo se, že právě těmto biochemickým konceptům studenti rozumí jen velmi málo (Tanner 2005). Dalším požadavkem je změna od studenta jako pasivního konzumenta vzdělávacího obsahu ke studentovi aktivně shromažďujícímu znalosti a podílejícího se na vzdělávacích aktivitách. Panuje obecná víra, že nástrojem pro uvedení vzdělávací reformy do chodu je zavádění počítačových technologií do výuky (Pelgrum 2001).

## **Nové technologie ve výuce**

Počítačové technologie mají velký potenciál v reformě a transformaci vzdělávání. Přesto se na cestu k dosažení úspěchů staví mnoho překážek. Vhodná integrace nástrojů počítačové techniky je komplexní jev zahrnující pochopení učitelovi motivace, vnímání a víru ve výuku a technologie (Keengwe 2008). Ukázalo se, že přestože školy disponují novými technologiemi, učitele jich příliš ve výuce nevyužívají. Frekvence využití nových technologií ve výuce přitom závisí na věku učitele a vlastní dosažené úrovni vzdělání, dále na typu školy a přístupu ke školení (Tasci 2010). Ze studií prováděných v USA navíc vyplynulo, že navzdory značnému zlepšení přístupu k nástrojům počítačové techniky (např. matematické softwary, Java nástroje, dynamické softwary pro využití v geometrii nebo analýzu dat, grafické kalkulátory nebo tabulkové procesory), implementace těchto nástrojů do výuky klesá (Waschira 2010). Dále byl studován vztah studentů základních a středních škol k počítačům. Méně pozitivní vztah k počítačům vykazovaly dívky. Podobně studenty z řad národnostních menšin se cítili při práci s počítači méně zdatní (Volman 2005).

## **Matematické modely a systémové modely ve výuce**

V biologii se uplatňují matematické modely zejména v meteorologii, genetice, imunologii nebo při modelování růstu populace či biochemických procesů. Ve výuce biologie nejsou však matematické modely běžné a využívají se spíše modely grafické. Svě místo začínají ve výuce zaujímat systémové modely. Příkladem je rozvoj kompetencí systémového modelování ve výuce buněčné biologie prostřednictvím využití nové vzdělávací strategie sestávající se ze čtyř modelovacích fází, jejímž výsledkem bylo zlepšení výstupů výuky (Verhoeff 2008).

## **Zavádění matematického modelování do výuky**

Jak vyplývá z výsledků diplomové práce, je matematické modelování pro žáky ZŠ i SŠ poměrně obtížné, což potvrzují i studie prováděné v Austrálii a Německu, bývá matematické modelování zpočátku pro střední školy obtížné (Stillman 2009, Kaiser a Schwarz 2006). Na druhé straně English (2004) uvádí, že i děti na základní škole se mohou úspěšně účastnit programů modelových problémů, jestliže jsou aktivity přizpůsobené dané úrovni. Lamon (2003) vidí problém v zavádění modelových aktivit do výuky spíše ve vzdělávací praxi než ve schopnostech studentů.

Podobný trend naznačuje dotazníkové šetření prováděné na školách Křesťanské gymnázium v Praze a SPŠP Zlín. Na základě výsledků uvedených v kapitole 4.4 je zřejmé, že práce s modely je globálnější problém, jehož řešení vyžaduje nejen výborné teoretické zázemí



v oblasti modelovaného jevu a uspokojivé ovládní matematiky, ale také vztah k počítačům. Pro efektivní práci je třeba mezioborové spolupráce učitelů, dobré motivace a alespoň zpočátku maximální zjednodušení materiálů – zejména chceme-li, aby v budoucnu zařazení modelových aktivitách do výuky bylo celoplošné, nikoli jen v rámci seminářů určených pro zájemce. Ze zkušeností z ostatních zemí se však ukazuje (viz kapitola 2.3.1), že cesta implementace matematického modelování do výuky od vysokých škol přes střední školy k základním může být dlouhá. Rozhodně tak celoplošné zařazení modelových aktivit do výuky vidím jako dlouhodobý cíl a v současném stádiu vývoje považuji za rozumnou cílovou skupinu studenty gymnázií.

Vzhledem ke komplexnímu charakteru modelových aktivit (zvládnutí práce s počítačem, dobré oborové zázemí, schopnost aplikovat matematické poznatky apod.) není možné práci s modely k výuce pouze přidat s dotací několika málo hodin. Je třeba změnit kurikulum tak, aby se modelování stalo pevnou součástí vyučování a bylo možno budovat kompetence k modelování během celého roku.

Dále se ukázalo, je nutné na práci s matematickými modely připravit především učitele, což také potvrzuje ve své práci Gilbert (2004), který zdůrazňuje potřebu znalostní a dovednostní vybavenosti učitele pro vedení modelových aktivit.

### **Úskalí spojená se zaváděním matematického modelování a modelů do výuky**

Učitelé přírodních věd se v současné době při plnění reformních ideálů ocitají pod velkým tlakem. Cítí se přemoženi četnými očekáváními, jež jsou často nejasná, a rozsahem povinností, který je na ně kladen. Cítí se izolovaní a bez podpory ve třídě (Mangrubang 2005). Matematické modelování představuje jednu z novodobých aktivit. Jde o aktivní způsob výuky, kdy se žáci podílejí na osvojování probírané látky. Je tedy časově mnohem náročnější než běžný frontální způsob výuky. Učitelé tak mohou být zdráhaví využít metody modelování právě pro nedostatek času. Dalším problémem v současné době je nepřipravenost učitelů na zavádění modelování do výuky, nedostatek informací a materiálů, které by jim počáteční práci usnadnily.

Neochota učitelů k aktivním metodám nemusí být dána jen omezenými časovými možnostmi, ale také skutečností, že při přijímacích zkouškách na vysoké školy jsou stále vyžadovány encyklopedické znalosti. Vzhledem k tomu, že prestiž střední školy je dána celkovou úspěšností studentů na přijímacím řízení, dostává se učitel k dilematu: Může upřednostnit již delší dobu proklamované ideje snižování poznatkové roztržitosti, aktivní zapojení studentů do výuky, ale tím snížit objem vědomostí. Nebo upřednostní klasický časově velmi efektivní

způsob výuky, který ponechává studenty v pasivitě a podporuje encyklopedičnost, nicméně zaručí jim úspěch na vysoké škole.

Celý problém tedy neleží zdaleka na bedrech jednotlivých učitelů, ale celkově na struktuře školství: změnit by se mělo již kurikulum budoucích učitelů na vysokých školách, priority ve školství (změna priorit by se samozřejmě měla jasně projevit v praxi a způsobu testování – dokud se o problémech jen mluví, nic se nevyřeší), poté kurikulum na středních školách. Modelování by však nemělo být ke kurikulu pouze přidáno, ale mělo by do kurikula dobře zapadat. Je snad výsměchem, že jsou budoucím učitelům vštěpovány nové ideje vzdělávání, ale jejich vlastní vzdělávání těmito idejím naprosto neodpovídá. Chceme-li aby se matematické modelování dostalo do středních škol, je třeba na to budoucí učitele řádně připravit a učitelům z praxe poskytnout dostatečnou nabídku seminářů, přednášek a materiálů, které jim umožní úspěšně novou metodu zařadit do výuky.

### **Matematické modelování (speciálně modelování fotosyntézy) ve výuce biologie**

Modelování vlivu faktorů (oxidu uhličitého, dusík, ozáření) na rychlost fotosyntézy pro střední školy nepovažuji v tuto chvíli za jednoduchý úkol a to z následujících důvodů:

- (a) **Matematické modelování není v současné době běžnou součástí výuky.** Ve výuce biologie je tato metoda naprostou novinkou. Mělo by patrně větší smysl začínat se zaváděním matematického modelování do výuky matematiky nežli biologie, kterou si mohou volit studenti, kteří s matematikou již nechtějí mít nikdy nic společného. Dotazníkové šetření tuto domněnku více-méně potvrdilo, neboť se ukázalo, že i přes znalostní handicap v oblasti biologie byly modely lépe přijaty na průmyslové škole.
- (b) **Fotosyntéza je velmi komplexní a složitý jev,** který zůstává často (nejen na středních školách) nepochopen. Proto je nevhodné snažit se její pochopení zkvalitnit pomocí metody, která je sama o sobě obtížná a pro jejíž použití se základy na školách teprve pokládají, a navíc v modelovacím prostředí, jehož osvojení vyžaduje další čas a úsilí.
- (c) **Seznamování učitelů se softwarem Stella.** Těžko si představit učitele, který si bude práci osvojovat pomocí manuálu, byť sebelepšího. Schůdným řešením by bylo osobní seznámení se softwarem v rámci seminářů, osobních setkání, kdy mohou učitelé vznášet dotazy a ověřit si, nakolik užívání tohoto nástroje pochopili.
- (d) **Těžiště významu matematického modelování vidím v možnosti budovat vlastní model,** přestože vlastní simulace má svůj nepopiratelný přínos a v počátcích zavádění matematického modelování do výuky dokonce považuji simulaci za prvotní fázi, se

kteřou by se měli studenti seznámit. Volně stažitelný je pouze prohlížeč modelů vytvořených v softwaru Stella. Pro vlastní tvorbu modelu je již nutný samotný software Stella, jehož pořizovací cena je 1 899 USD.

Pro shrnutí bych uvedla, že matematické modelování může oživit a zkvalitnit dosavadní způsob výuky a je vhodným nástrojem pro dosažení stanovených kurikulárních cílů. Jeho zavedení má však prozatím větší opodstatnění ve výuce matematiky nebo fyziky. Bude-li modelování pevnou součástí kurikula matematiky, lze očekávat, že implementace metody do dalších předmětů již nebude představovat takové „násilí“.

### **Zařazení matematického modelování a modelů do výuky**

Pokud by se podařilo komplexním přístupem na školách položit základy pro efektivní využití modelů ve výuce, je vhodné zařadit práci s modely do volitelných seminářů ve čtvrtém ročníku na gymnáziu. Jedním z důvodů tohoto zařazení je celková připravenost studentů – po stránce matematické a biologické, a dále skutečnost, že si studenti semináře sami volí. Jak se ukázalo, ovlivňuje výsledky při práci s modelem vztah nejen k biologii, matematice, ale také k počítačům. Proto bych v současné době modelování nezařazovala do výuky celoplošně, ale pouze pro zájemce, kteří budou k práci vysoce motivováni, ať už samotným vztahem k uvedeným disciplínám nebo potřebou zapojit se do nových, neprobádaných aktivit.

Pro modelování je nutné vybírat vhodná témata, která nám umožní respektovat přístup systémového myšlení – zejména v případě, že se učitel rozhodne modely tvořit v softwaru Stella, který byl vytvořen pro určité účely, proto by bylo nemístné vytvářet modely, které se stejně dobře mohou vytvořit např. v Microsoft Office Excel. Rozhodne-li se tedy učitel k modelování použít Stellu, měl by jasně vědět proč tak činí a s vědomím, jaké výhody Stella oproti jiným softwaru podobného ražení přináší.

### **5.3. Diskuse použitých softwarových prostředí pro modelování a zásad modelování ve výuce**

Jedním z cílů diplomové práce bylo vytvořit modely vlivu vybraných faktorů na rychlost fotosyntézy v softwaru Stella, který zachytí strukturu systému a pomůže vytvořit představu, jakými mechanismy vybrané faktory rychlost fotosyntézy ovlivňují, a jehož výstupem bude graf závislosti rychlosti fotosyntézy na jednom z faktorů prostředí (např. oxidu uhličitého) při změně hodnoty dalších parametrů (např. ozářenosti). Největším úskalím tohoto úkolu bylo vytvořit model v souladu s přístupem systémového myšlení, který má pro tvorbu modelu – vzhledem k účelům pro které byl software Stella vytvořen – jasná doporučení. Tato

doporučení se často v případě zpracovávaného tématu fotosyntézy obtížně dodržovala. Mezi některá doporučení patří:

1) **Pracovat s „rozumnými čísly“**. To znamená nepracovat ani s malými (např. 0,001) ani s příliš velkými (např.  $10^6$ ). Vzhledem k tomu, že se např. koncentrace oxidu uhličitého pohybuje při zvolených jednotkách v rozmezí 0,1 – 0,65 g(C)·m<sup>-3</sup> nebo kvantový výtěžek v rozmezí  $2,73 \cdot 10^{-6}$  –  $8,5 \cdot 10^{-6}$  g(C)·J<sup>-1</sup>, představuje toto určitou komplikaci. Řešením by samozřejmě byl vhodný převod jednotek, např. uvádět koncentraci oxidu uhličitého v jednotkách  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , čímž bychom se řádově posunuly až o tři místa. Nicméně vzhledem k množství faktorů, které do procesu fotosyntézy vstupuje, nebylo v rámci zachování konzistence jednotek toto řešení schůdné.

2) **Vyhýbat se modelům typu „mrtvý buvol“**. Model typu „mrtvý buvol“ neobráží strukturu systému a mechanismus jakým jednotlivé faktory proces ovlivňují. „Mrtvý buvol“ pouze představuje seznam faktorů, který daný proces ovlivňuje – viz Obr. 15.

3) **Vyhýbat se rovnicím, kde působí více jak 2 až 3 vlivy**. Dodržení tohoto principu (spolu s bodem 2 výše) bylo hlavní překážkou vytvoření smysluplného modelu vlivu teploty na rychlost fotosyntézy, kde do „hry“ vstupuje více parametrů, které se navíc nedají smysluplně interpretovat (např. parametr určující míru zakřivení křivky) – viz Obr. 16. Přestože závislost rychlosti fotosyntézy na teplotě popisuje zajímavý graf – viz Obr. 17, který není stereotypně stejný jako u ostatních faktorů ovlivňujících rychlost fotosyntézy, lépe by se pro grafické vyjádření závislosti hodil Microsoft Office Excel. Tím ovšem stále zůstává zahalen mechanismus jímž teplota rychlost fotosyntézy ovlivňuje.

4) **Stella pracuje s koncepty a matematika mnohdy ustupuje do pozadí**. Stella pracuje s představami o zpětných vazbách, vzájemné souvislosti jednotlivých faktorů, zviditelňuje mentální modely zvoleného výseku reality, přičemž matematika v tomto případě ustupuje do pozadí. Chceme-li nicméně, vedle věrohodného popisu struktury systému, získat navíc grafické vyjádření závislosti, je matematizace nutná. V literatuře jsou ale dostupné pouze empirické modely fotosyntézy<sup>26</sup>, které naprosto nevysvětlují mechanismus působení daného

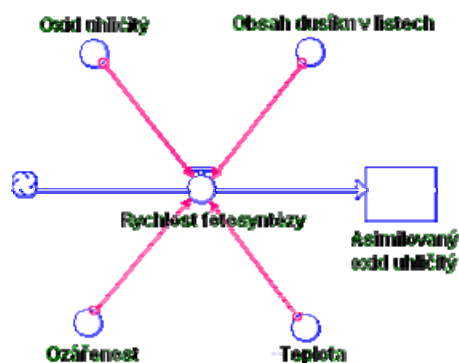
---

<sup>26</sup> **Empirický model** vzniká ze statistického zpracování naměřených dat.

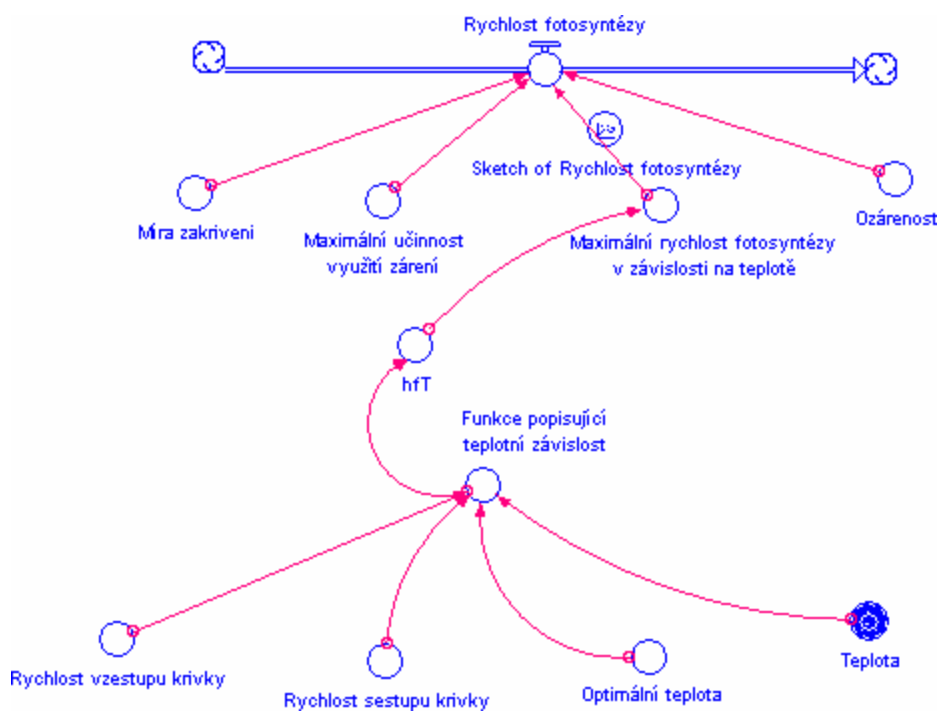
faktoru na rychlost fotosyntézy. Tyto vzorce navíc nezahrnují faktor času, čímž se dostáváme do bodu 5.

5) **Stella byla vyvinuta pro tvorbu dynamických modelů.** Přestože lze ve Stelle pracovat i se vzorci, které neobsahují faktor času, je takový postup poněkud násilný a vzhledem k tomu, že takové vzorce neobrážejí strukturu systému, bylo by v daném případě smysluplnější pracovat v prostředí Microsoft Excel.

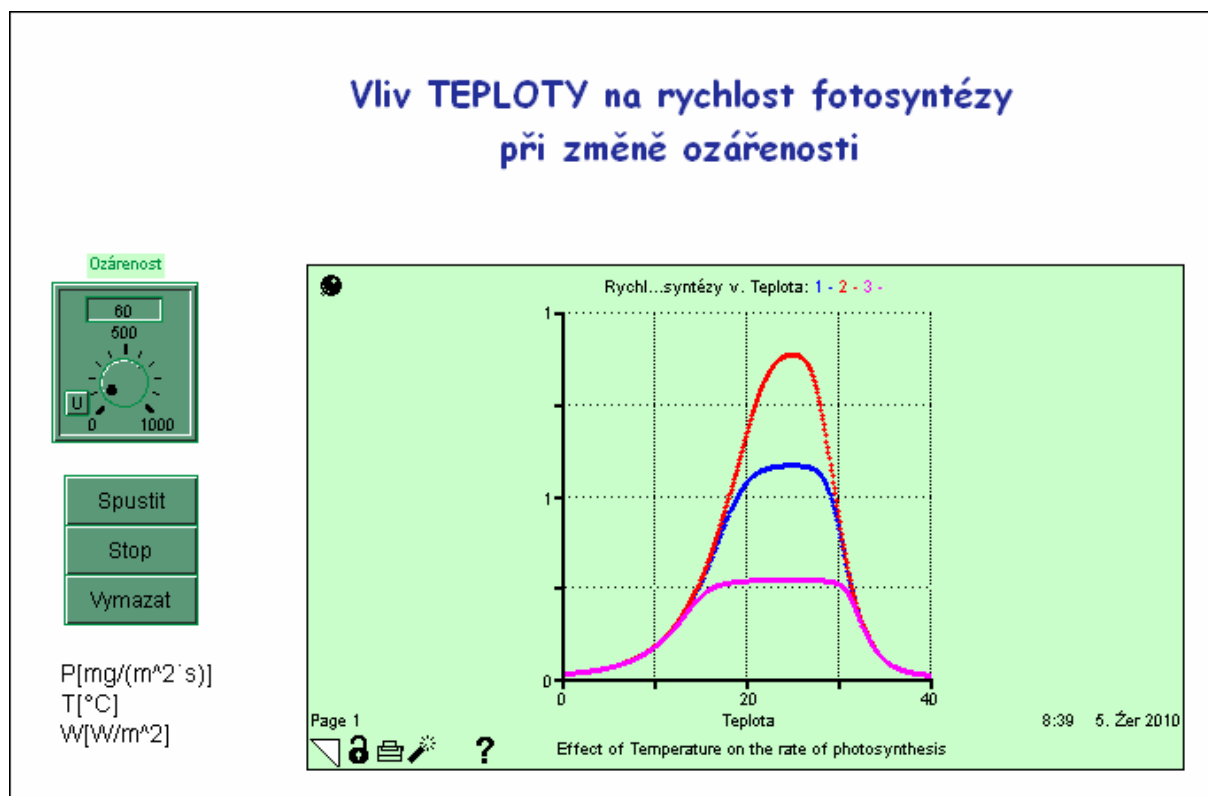
6) **Vymanit se ze zahlcení detaily a dokázat se podívat na systém jako celek.** Vzhledem k zadání diplomové práce se nicméně určité detailnosti nevyhneme a to bohužel dokonce nad rámec středoškolského učiva – což na druhé straně je v procesu modelování často nevyhnutelná situace. Jako příklad mohu uvést model vlivu koncentrace oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy, kdy bylo nutné zahrnout do modelu i další parametry jako je vodivost nebo kvantový výtěžek. Jde o pojmy, které studenti slyší v biologii poprvé. Model fotosyntézy tak přináší do tématu, které je pro studenty středních škol již tak obtížně srozumitelné, další informace a abstrakce, které podle zkušeností ze semináře GLOBE dokázali ocenit spíše učitelé nežli studenti.



Obr. 15 Model typu „mrtvý buvol“



Obr. 16 Model závislosti rychlosti fotosyntézy na teplotě



Obr. 17 Graf popisující závislost rychlosti fotosyntézy na teplotě při změně ozáření.

## Software Stella

Stella má několik nedostatků jak technických, tak didaktických. Z technických nedostatků považuji za závažný nedostatek problémy při definování grafů (výběr typu grafu, volba závisle a nezávisle proměnné, zadávání definičního oboru a oboru hodnot). Chceme-li nastavit výše uvedené vlastnosti najednou, často se zobrazí upozornění na chybu. Problém se odstraní, pokud definujeme graf ve dvou krocích – v prvním provedeme výběr typu grafu a zvolíme proměnné, ve druhém kroku definujeme definiční obor a obor hodnot. K práci s grafy se pojí další potíže lehčího rázu, kdy např. nelze odebírat již přidané stránky v *Graph Pad* nebo po vymazání celého Graph Pad zůstávají parametry, které původně byly v grafu zvolené, nedostupné (problém se vyřeší, pokud před jeho vymazáním zrušíme veškerá nastavení všech grafů v Graph Pad neboli vymažeme prázdný Graph Pad). Dále je třeba zmínit nekorektní fungování *Status indicator*, kdy se pro nastavené hodnoty správně nezobrazí zelená, žlutá a červená barva.

Jednoznačným didaktickým nedostatkem je nemožnost zobrazit u grafů jednotky a přehledný popis souřadných os. Při tvorbě modelů v softwaru Stella se doporučuje pracovat s „pěknými“ čísly. V praxi to znamená, zadáme-li například maximální hodnotu oboru hodnot 0.001, tato hodnota se zobrazí na ose y jako 0. Podobně Stella nepodporuje delší popisky diagramů ve vrstvě Map a Model. Negativním dopadem dlouhého popisku je jeho částečné nahrazení tečkami při zobrazení v grafech a tabulkách. Software Stella dále neumožňuje psát diakritická znaménka (např. ř, ý, ů) u diagramů ve vrstvě Map a Model, dále dolní a horní indexy u diagramů ve vrstvě Map a Model a textových polích. Veškeré „nedostatky“ tohoto odstavce jsou nicméně pochopitelné s přihlédnutím ke vzdělávacímu účelu softwaru Stella, jež podporuje maximální jednoduchost a z tohoto pohledu je práce s ne extrémními čísly a krátkými, výstižnými popisky diagramů opodstatněná. Podobně se dá pochopit nemožnost psát určitá písmena v anglické verzi programu.

## Prohlížeč Isee Player

Pro výukové účely neshledávám práci s pouhým prohlížečem za zcela vyhovující. Vzhledem k tomu, že je prohlížeč určen pouze pro čtení, neumožňuje řadu úkonů, které by byly ze vzdělávacího hlediska užitečné:

- Při simulaci občas dochází k potížím při nastavování hodnot parametrů v *List Input Device* – pokud nelze parametr v List Input Device nastavit na požadovanou hodnotu, je jediným řešením prohlížeč zavřít a znovu otevřít.

- Ve vrstvě Map a Model není přístup k jednotkám parametrů.
- Ve vrstvě Map a Model není zobrazena lišta nástrojů, a tedy nelze provádět jakékoli úpravy modelu, přestože právě tvorba nebo dotváření modelu představuje významný aktivní a tvůrčí přístup ve výuce.

Přestože by se mohlo zdát, že Stella má řadu nevýhod, považuji ji za užitečný nástroj s velkým potenciálem, který v této práci nebyl plně využit (např. vytvoření vlastního modelu nebo vyjádření vlastních představ o daném systému). Výše uvedené problémy přičítám spíše zadanému tématu. Rozhodně si myslím, že Stella má své místo ve výuce biologie. Jen bych při další práci lépe zvažovala vybrané téma.

### **Isee Runtime 9.0.2**

K Isee Runtime nemám jakožto nástroji pro prezentaci modelů žádné výhrady. Díky režimu full-screen navíc nepůsobí grafika chaoticky narozdíl od prohlížeče Isee Player.

## **5.4. Závěrečné zamyšlení**

Fotosyntéza je základní proces, který zabezpečující život na Zemi. Fotosyntézou vzniká ze vzdušného oxidu uhličitého téměř veškerá biomasa rostlin. Biomasa rostlin je základem potravní pyramidy a slouží jako výživa lidstvu. Vegetační pokryv je dále jedním z klimatotvorných faktorů. Přestože je fotosyntéza významný proces, bez kterého by nebyl život na Zemi, studenti mu jen velmi málo rozumí, neboť je to proces velmi složitý a není mu ve výuce věnován patřičný prostor. Vytvořené modely vlivu vybraných faktorů prostředí na rychlost fotosyntézy a také materiály, které práci s modely usnadňují, by měly přispět k hlubšímu pochopení tohoto významného procesu při výuce na středních odborných školách a gymnáziích.

Přestože ne všechny materiály pravděpodobně zaujmou pevné místo ve výuce biologie, představují materiály již určitý základ pro toho, kdo by chtěl na práci navázat nebo se matematickým modelováním ve výuce biologie dále zabývat. Rozhodně však vytvořené materiály mohou sloužit pro nadané studenty a zájemce o matematické metody. Nutno dodat, že na tomto poli existuje bezesporu ještě spousta práce. Pro mě jako učitelku biologie a matematiky bude rozhodně zajímavé tento přístup rozvíjet také ve výuce matematiky.

V současné době, kdy jsme zahlceni novými informacemi o fungování složitých systémů, včetně ekosystémů, na všech úrovních, nabývá pochopení matematického modelování velkého významu. Model totiž přináší řadu výhod - umožňuje pozorování a predikci procesů



pod různým vlivem faktorů, a tím umožňuje snižovat množství chybných zákroků, například při managementu ekosystémů. Proto by modelování na školách mělo získat pevné místo ve výuce nejen biologie, ale obecně v matematice. Za přínos své diplomové práce považuji skutečnost, že přináší jednak obecné základy a hlavní principy modelování, dále je rozvíjí na příkladu procesů fotosyntézy a umožňuje tak nový pohled na výuku fotosyntézy a tvorby rostlinné biomasy v biologii rostlin. Doufám, že má diplomová práce přispěje k otevření dveří matematickému modelování do výuky jak matematiky, tak biologie a že zároveň umožní ve výuce biologie věnovat větší pozornost objasnění a pochopení procesu fotosyntézy.

## 6. Závěry

Předložená diplomová práce je zaměřena na vytvoření modelů vlivu vybraných faktorů na rychlost fotosyntézy a vypracování podkladových materiálů umožňujících efektivní práci s modely na středních školách. Tyto výukové materiály byly vypracovány v rámci projektu NSF a programu GLOBE Cycle (Finanční zajištění práce: Project National Science Foundation, USA, #0627916, Exploring Ecosystems and the Atmosphere in the K-12 Classroom: A Plan to Integrate NASA Karbon Cycle Science with GLOBE), řešeného na Katedře experimentální biologie rostlin.

V rámci diplomové práce:

- 1) Byly vytvořeny 3 modely vlivu vybraných faktorů na rychlost fotosyntézy – vybranými faktory jsou koncentrace oxidu uhličitého, ozáření a obsah dusíku v listu.
  - *Vyvětrej si* zaměřený na pochopení vlivu CO<sub>2</sub> na zdraví člověka. Vzrůst koncentrace oxidu uhličitého v uzavřené místnosti je v modelu důsledkem dýchání člověka.
  - Model vlivu oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy.
  - Model vlivu obsahu dusíku v listech na rychlost fotosyntézy.
- 2) Byly vypracovány pracovní listy pro studenty a metodické manuály pro učitele jako podklad pro práci s modely – viz příloha 9.1 a 9.2.

## 9. Příloha

### 9.1. Pracovní listy pro studenty

9.1.1. Pracovní list 01 – Ppm

9.1.2. Pracovní list 02 – Vyvětrej si

9.1.3. Pracovní list 03 – Cesta do hlubin

9.1.4. Pracovní list 04 – Ozáření a oxid uhličitý

### 9.2. Metodické manuály pro učitele

9.2.1. Metodický manuál 01 – Ppm

9.2.2. Metodický manuál 02 – Vyvětrej si

9.2.3. Metodický manuál 03 – Cesta do hlubin

9.2.4. Metodický manuál 04 – Oxid uhličitý a ozáření

- 3) Dále byly vypracovány další podpůrné materiály zlepšující efektivitu využití modelů:
  - prezentace seznamující studenty se systémovým myšlením,

- úvod do modelování v softwaru Stella,
  - seznámení s jednotkami ppm,
  - zopakování základních informací o stavbě listu, buňky a chloroplastu rostliny.
- 4) Modely a výukové materiály byly osobně prezentovány na dvou seminářích pro pilotní školy programu GLOBE v rámci dvoudenního semináře na PřF UK dne 4. – 5.4. 2008 a 11.-12.4. 2010 a předány k otestování dvěma pilotním školám.
- 5) Byl proveden návrh na úpravy modelů a výukových materiálů na základě zpětné vazby z pilotních škol GLOBE získané formou dotazníkového šetření.
- 6) Byl vytvořen literární úvod sloužící jako teoretický základ pro vypracované výukové materiály týkající se vlivu jednotlivých faktorů na rychlost fotosyntézy, dále principů a typů modelování, který přesahuje středoškolské znalosti.

## 7. Seznam použité literatury

1. ABRAHÁM V. (2005): *Počítačová podpora výuky Matlabu: Programování - elektronická učební pomůcka*. (Bakalářská práce) Zlín, UTB.
2. ALLEN D.J., DONALD R.(2001): *Impacts of Chilling Temperatures on Photosynthesis in Warm-Climate Plants*. Trends in Plant Science **6** (1): 36 – 42.
3. ARANSON D. (1996): *Overview of Systems Thinking*. Communications. [http://www.thinking.net/Systems\\_Thinking/OverviewSTarticle.pdf](http://www.thinking.net/Systems_Thinking/OverviewSTarticle.pdf) [cit. 2010 – 17 – 07]
4. BACON KÊ (2001): *Photosynthesis: Photobiochemistry and Photobiophysics*. Kluwer Academic, Dordrecht.
5. BLACK, C.C (1973): *Photosynthetic karbon fixation in relation to net CO<sub>2</sub> uptake*. Ann. Rev.Plant Physiol. **24**: 253 – 286.
6. BLUM W.E et a. (2002): *ICMI Study 14: Applications and Modelling in Mathematics Education – Discussion Dokument*. Educational Studies in Mathematics **51**: 149–171.
7. BYOTT, G. S. (1976): *Leaf air space systems in C3 and C4 species*. New Phytol. **76**, 295-299.
8. CAMBELL G.S., NORMAN, J.M. (1998): *Introduction to Environmental Biophysics*. 2nd edition. Springer, USA.
9. CRISPEELS M.J., SADOVA E.D. (2003): *Plants, genes and crop biotechnology*. 3th edition. Jones and Bartlett, London.
10. DeLUCIA D.H., NELSON K., VOGELMANN T.C., SMITH W.K. (1996): *Contribution of intercellular reflectance to photosynthesis in shade leaves*. Plant, Celt and Environment **19**: 159-170.
11. DENGLER, N.G., NELSON T. (1999): *Leaf Structure and Development in C 4 Plants*. In „C4 Plant Biology“ (Sage R.F., Monson, R.K.eds) San Diego: Academic Press.
12. DEWAR C. (1996): *The Correlation between Pplant Growth and Intercepted Radiation: An Interpretation inTerms of Optimal Plant Nitrogen Content*. Annals of Botany **78**: 125-136.
13. EHLERINGER, J. R. AND MONSON, R. K. (1993): *Evolutionary and ecological aspects of photosynthetic pathway variation*. Ann. Rev. Ecol. Syst. **24**, 411-439.
14. ELLNER S.P. (2004): *Dynamic Models in Biology*. Cornell University.

15. ELLSWORTH D.S. et al. (2004): *Photosynthesis, Carboxylation and Leaf Nitrogen Response of 16 Species to Elevated pCO<sub>2</sub> across Four Free-air CO<sub>2</sub> Enrichment Experiments in Forest, Grassland and Desert*. *Global Change Biology* **10**: 2121–2138.
16. ENGLISH L.D. (2002): *Handbook of International Research In Mathematical Education*. 1st edition. Lawrence Erlbaum, Mahwah (USA).
17. ENGLISH L.D. (2003): *Reconciling Theory, Research, and Practice: A Models and Modeling Perspective*. *Educational Studies in Mathematics* **54** (2 – 3): **225–248**.
18. ENGLISH L.D. (2006): *Mathematical Modeling in the Primary School: Children's Construction of a Consumer Guide*. *Educational Studies in Mathematics* **63** (3): 303–323.
19. ENGLISH L.D., WATTERS J. (2004): *Mathematical Modeling in the Early School Years*. *Mathematics Education Research Journal* **16** (3): 59-80.
20. EVANS J.R., SEEMANN J.R. (1989): *The Allocation of Protein Nitrogen in The Photosynthetic Apparatus: Costs, Consequences, and Control*. In: Briggs WR (ed) *Photosynthesis*. Pp 183–205. Alan R Liss Inc., New York.
21. FARQUHAR G.D., von CAEMMERER S., BERRY J.A. (1980): *Abiochemical Model of Photosynthetic CO<sub>2</sub> Assimilation in Leaves of C3 Species*. *Planta* **149**: 78–90.
22. FITTER A.H., HAY R.K.M.(1981): *Environmental Physiology of Plants*. Academic Press, London, New York, Toronto, Sydney a San Francisco.
23. FORD F.A. (1999): *Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Model sof Environmental Systems*. Island Press, Washington D.C., Covelo CA.
24. FORRESTER J. W. (1994): *Learning through System Dynamics as Preparation for the 21st Century*. *Creative Learning Exchange* **3** (3).
25. FOYER CH.H., NOCTOR G. (2002): *Photosynthetic Nitrogen Assimilation and Associated Carbon and Respiratory Metabolism*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
26. GARCÍA F.J., GASCÓN J., HIGUERAS L.R., BOSCH M. (2006): *Mathematical Modelling as a Tool for the Connection of Schoul Mathematics*. *ZDM* **38** (3): 226 – 246.
27. GILBERT J.K. (2004): *Models and Modelling: Routed to More Authentic Science Education*. *International Journal of Science and Mathematics Education* **2**: 115–130.
28. GOLD H.J. (1932): *Mathematical Modeling of Biological Systems*. Wiley-Interscience publication, USA.

29. HABERLANDT, G. (1882): *Vergleichende Anatomie des Assimilatorischen Gewebesystems der Pflanzen*. Jahrb. Wiss. Bot. **13**, 74-188.
30. HABERLANDT, G. (1884): "*Physiological Plant Anatomy*" (Transl. M. Drummond). Macmillan, London.
31. HATCH, D.H.(1999): *C4 photosynthesis: A Historical Overview*. In „C4 Plant Biology“ (Sage R.F., Monson, R.K.eds) San Diego: Academic Press.
32. HATCH, M. D., AND SLACK, C.R. (1966): *Photosynthesis by Sugar Cane Leaves: A New Carboxylation Reaction and the Pathway of Sugar Formation*. Biochem. J. **101**, 103-111.
33. HEMSLEY A.R., POOLE I. (2004): *The Evolution of Plant Physiology: From Whole Plants to Ecosystems*. Elsevier Academic Press, Amsterdam, Boston.
34. CHENK A.K. (2001): *Teaching Mathematical Modelling in Singapore Schools*. The Mathematics Educator **6** (1): 63-75.
35. JOHNSON-LAIRD P.N. (2006): *How We Reason*. Oxford University Press, New York.
36. KAISER G., BLOMHØJ M., SRIRAMAN B. (2006): *Towards a didactical theory for mathematical modelling*. ZDM **38** (2): 82 – 85.
37. KAISER G., SCHWARZ B.(2006): *Mathematical Modelling as Bridge between School and University*. ZDM **38** (2): 196-208.
38. KARPILOV, YU, S. (1960): *The Distribution of Radioactive Carbon 14 Amongst The Pproducts of Photosynthesis of Maize*. Trudy Kazansk Sel'shokhoz Institute **41** (1), 15-24..31, 315-322.
39. KEENGWE J., ONCHWARI G., WACHIRA P. (2008): *Computer Technology Integration and Student Learning: Barriers and Promise*. Journal of Science Education and Technology. **17** (6): 560-565.
40. KORTSCHAK, H. P., HARTT, C. E., AND BURR, G. O. (1965): *Carbon Dioxide Fixation in Sugar Cane Leaves*. Plant Physiol. **40**, 209-213.
41. KOVÁŘOVÁ M. (2010): *Jak dokáží přežít rostliny na toxických výsypkových substrátech? Fyziologické a strukturální vlastnosti rostlin na substrátech s vysokým obsahem As a Hg*. Bakalářská práce. Praha, PřF UK.

42. LAETSCH, W. M. (1971): *Chloroplast Structural Relationships in Leaves of C4 plants*. In *Photosynthesis and Photorespiration*" (M. D. Hatch and R. O. Slayter, eds.) pp. 323-349, Wiley- Interscience, New York.
43. LAMBERS H., CHAPIN F.S., PONS T.L (2008): *Plant Physiological Ecology*. 2nd edition. Springer, New York.
44. LAMON S. (2003). *Beyond Constructivism: An Improved Fitness Metaphor for Theacquisition of Mathematical Knowledge*. In: R. A. Lesh, & H. M. Doerr (Eds.). *Beyond constructivism: Models and modeling perspectives on mathematics problemsolving, learning, and teaching*. Pp. 435-448. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
45. LARCHER W.(2003): *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Group*. 4th edition. Springer, New York.
46. LARSES O., EL-KHOURY (2005): *Views on General Systems Theory*. Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm.
47. LAWLOR D.W (2001): *Photosynthesis*. 3th edition. BIOS Scientific Publisher, Oxford.
48. LEE D.W et all (2000): *Effects of Irradiance and Spectral Duality on Leaf Structure and Function in Seedlings of Two Southeast Asian Hopea (Dipterocarpaceae) Species*. *American Journal of Botany* **87**(4): 447–455.
49. LEE D.W. (1986): *Unusual Strategies of Light Absorption in Rain-forest Herbs*. In: *On the Economy of Plant Form and Function* (ed. T.J. Givnish). Pp. 105-131. Cambridge University Press, London.
50. LEEGOOD R.C., SHARKEY T.D., CAEMMERER S.Von (2000): *Photosynthesis: Physiology and Metabolism*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Boston, London.
51. LEEGOOD R.C., SHARKEY T.D., von CAEMMERER S. (2000): *Photosynthesis: Physiology and Metabolism*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Boston.
52. LINGEFJÄRD T. (2002): *Mathematical Modelling for Preservice Teachers: A Problem from anesthesiology*. *International Journal of Computers for Mathematical Learning* **7**: 117–143.
53. LINGEFJÄRD T. (2006): *Faces of Mathematical Modeling*. *ZDM* **38** (2): 96-112.
54. LONG S.P., ORT D.R. (2010): *More Than Taking The Heat: Crops and Global Change*. *Current Opinion in Plant Biology* **13** (3): 241-248.

55. LORETO F., HARLEY P.C., MARCO G.Di, SHARKEY T.D.(1992): *Estimation of Mesophyll Conductance to CO<sub>2</sub> Flux by Three Different Methods*. *Plant Physiol.* **98**: 1437-1443.
56. MANGRUBANG F. R (2005): *Issues and Trends in Science Education: The Shortage of Qualified Science Teachers*. *American Annals of the Deaf.* **150** (1): 42-46.
57. METZLER D.E., METZLER C.M.(2001): *Biochemistry: The Chemical Reaction of Living Cells*. 2nd edition. Academic Press, San Diego.
58. MINORSKY P.V. (2003): *Achieving The in Silico Plant: Systems Biology and the Future of Plant Biological Research*. *Plant Physiology* **132**: 404–409,
59. MOHR M., SCHOPFER M.(1995): *Plant Physiology*. Springer, Berlin.
60. MUNEEER T., GUEYMARD C., KAMBEZIDIS H. (2004): *Solar Radiation and Daylight Models*. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, Amsterdam, Boston.
61. MURATA, Y., AND IYAMA, J. (1963): *Studies on The Photosynthesis of Forage Crops. II. Influence of Air Temperature*. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*
62. NÁTR L.(1998): *Fotosyntéza*. In: Procházka S., Macháčková I. Krekule J., Šebánek J. a kol. *Experimentální biologie*. Str. 124 – 171. Academia, Praha.
63. NÁTR L. (2006): *Země jako skleník. Proč se bát CO<sub>2</sub>?*. Academia, Praha, 142.
64. NOBEL P.S. (2009): *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 4th edition. Academic Press, San Diego.
65. OECD PISA (2000): *Measuring Student Knowledge and Skills: A New Framework for Assessment*. <http://www.oecd.org/dataoecd/45/32/33693997.pdf> [cit. 2010 – 15 – 07]
66. OSAKI M., SHINANO T., TADONO T. (1993): *Effect of Nitrogen Application on The Accumulation of Ribulose-1,5-bisphosphate Carboxylase Oxygenase and Chlorophyll in Several Field Crops*. *Soil Sci Nut* **39**: 427–436.
67. PAVLOVÁ L. (2005): *Fyziologie rostlin*. Karolinum, Praha.
68. PELGRUM W.J. (2001): *Obstacles to The Integration of ICT in Education: Results from a Worldwide Educational Assessment*. *Computers and Education.* **37**:163–178.
69. PEŠAT P.(2010): *Fyzikální měření v prostředí Coach 6*. TU v Liberci, Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická.



<http://gynome.nmm.cz/konference/files/2010/sbornik/pesat.pdf> [aktualizováno 2.3.2010]

70. POLLAK H.O. (1970). *Applications of Mathematics*. In: E. Begle (Ed.). *The Sixty-ninth Yearbook of the National Society for the Study of Education* (pp. 311–334). University of Chicago Press, Chicago.
71. PROCHÁZKA a kol. (2003): *Fyziologie rostlin*. Academia Praha, 484.
72. RAGHAVENDRA A.S.(2000): *Photosynthesis: A Comprehensive Treatise*. Cambridge Academic Press, New York.
73. RHOADES, M. M., AND CARVALHO, A. (1944): *The Function and Structure of The Parenchyma Sheath Plastids of Maize Leaf*. *Bull Torrey Botanical Club* **7**, 335-346
74. RICHMOND B.(2004): *An Introduction to Systems Thinking*. Isee systems. (dostupné též online: [http://www.iseesystems.com/resources/Articles/STELLA\\_IST.pdf](http://www.iseesystems.com/resources/Articles/STELLA_IST.pdf))
75. ROBERT K.M.Hay, PORTER J.R. (2006): *The Physiology of Crop Yield*. 2nd edition. Wiley-Blackwell, Oxford.
76. SAGE R.F., KUBIEN P.S. (2007): *The Temperature Response of C3 and C4 Photosynthesis*. *Plant, Cell and Environment* **30**: 1086 – 1106.
77. SAGE R.F., PEARCY R.W., SEEMANN J.R. (1987): *The Nitrogen Use Efficiency of C3 and C4 Plants. I. Leaf Nitrogen Effects on The Gas Exchange Characteristics of Chenopodium Album (L.) and Amaranthus Retroflexus (L.)*. *Plant Physiol* **84**: 959–963.
78. SAGE, R.,F. (2002): *Variation in The kcat of Rubisco in C3 and C4 Plants and Some Implications for Photosynthetic Performance at High and Low Temperature*. Vol.53: *Journal of Experimenta Botany*, **369**: 609-620.
79. SLAVÍKOVÁ, J. (1986): *Ekologie rostlin*. 1. vydání. SPN, Praha.
80. SMITH W.K. et al (1997): *Leaf Form and Photosynthesis: Do Leaf Structure and Orientation Interact to Regulate Internal Light and Carbon Dioxide?* *BioScience* **47** (11): 785-793.
81. STILLMAN G., GALBRAITH P. (2009): *Softly, Softly: Curriculum Change in Applications and Modelling in the Senior Secondary Curriculum in Queensland*. In: Hunter R., Bicknell B., Burgess T. (Eds.). *Crossing divides: Proceedings of the 32nd annualconference of the Mathematics Education Research Group of Australasia* (Vol. 2) Palmerston North, NZ: MERGA.

82. SVOBODOVÁ J. (2010): *Fyzikálně chemické faktory školního prostředí* <http://svp.muni.cz/ukazat.php?docId=48> [aktualizováno 16.5. 2010]
83. TANNER K., ALLEN D. (2005): *Approaches to Biology Teaching and Learning: Understanding the Wrong Answers—Teaching toward Conceptual Change*. Cell Biology Education **4**(2): 112-117.
84. TASCI G., YAMAN M., SORAN H. (2010): *Review of Status Regarding Biology Teachers' Using New Technologies in Education*. Hacettepe Universitesi Egitim Fakultesi Dergisi-Hacettepe University Journal of Education (38): 267-278..
85. TATE W., ROUSSEAU C. (2002). *Access and Opportunity: The Political and Social Context of Mathematics Education*. In: English L. D. (Ed). Handbook of international research in mathematics education. Pp. 271-300. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.US
86. TERASHIMA I., ARAY T., MIYAZAWA S-I., SONE K., YANO S. (2005): *Construction and Maintenance of the Optimal Photosynthetic Systems of the Leaf, Herbaceous Plant and Tree: an Eco-developmental Treatise*. Annals of Botany **95**: 507 – 519.
87. TERASHIMA I., HIKOSAKA K. (1995): *Comparative Ecophysiology of Leaf and Canopy Photosynthesis*. Plant. Cell and Environment **18**: 1111-1128.
88. TESAŘ J., BARTOŠ P.: *Využití Graphical User Interface programu MatLab při výuce optiky*. JU v Českých Budějovicích, Katedra fyziky.  
[http://dsp.vscht.cz/konference\\_matlab/MATLAB07/prispevky/tesar\\_bartos/tesar\\_bartos.pdf](http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB07/prispevky/tesar_bartos/tesar_bartos.pdf) [cit. 2010 – 16 – 07]
89. THORNLEY J.H. (1976): *Mathematical Models in Plant Physiology*. Academic Press, London, New York, San Francisco.
90. TROCHIM W.M. et al. (2006): *Practical Challenges of Systems Thinking and Modeling in Public Health*. American Journal of Public Health **96** (3): 538 – 546.
91. VACHEK J., LEPIL O. (1980): *Modely a modelování ve vyučování fyzice*. 1. vyd. SPN, Praha.

92. VERHOEFF R.P., WAARLO A.J., BOERSMA K.Th.(2008): *Systems Modelling and the Development of Coherent Understanding of Cell Biology*. International Journal of Science Education. **30** (4): 543 – 568.
93. VOGELMANN T.C. (1993) *Plant Tissue Optics*. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology **44**: 231 -251.
94. VOLMAN M., E.van ECK, HEEMSKERK I., KUIPER E. (2005): *New Technologies, New Differences. Gender and Ethnic Differences in Pupils' Use of ICT in Primary and Secondary Education*. Computers & Education. **45** (1): 35-55.
95. von CAEMMERER S. (2000): *Biochemical Models of Leaf Photosynthesis*. CSIRO, Collingwood .
96. WACHIRA P., Keengwe J. (2010): *Technology Integration Barriers: Urban School Mathematics Teachers Perspectives*. Journal of Science Education and Technology. 1- 9.
97. WOLKENHAUER O., MESAROVIC M.(2005): *Feedback Dynamics and Cell Function: Why Systems Biology Is Called Systems Biology*. Mol. BioSyst.**1**: 14–16.
98. YAMORI W., EVANS J.R., von CAEMMERER S. (2010): *Effects of Growth and Measurement Light Intensities on Temperature Dependence of CO<sub>2</sub> Assimilation Rate in Tobacco Leaves* pce\_2067. Plant, Cell and Environment **33**: 332 – 343.
99. YIN X.Y., STRUIK P.C. (2010). *Modelling The Crop: From System Dynamics to Systems Biology*. Journal of Experimental Botany **61** (8): 2171-2183.
100. ZEMELMAN S., DANIELS H., HYDE A.A., VERNER W. (1998): *Best Practice - New Standards for Teaching and Learning in America's Schools*. Heinemann, Portsmouth, NH.

## 8. Webové stránky

**Cabri Geometrie**, <http://www.cabri.net> [cit. 2010 – 15 – 07]

**Coach 6**, <http://www.cma.science.uva.nl/english/Software/Coach6/Coach6.html> [cit. 2010 – 15 – 07]

**Earth System Research Laboratory**, <http://www.esrl.noaa.gov> [cit. 2010 – 23 – 08]

**GLOBE Carbon Cycle**, <http://globecarboncycle.unh.edu/> [cit. 2010 – 23 – 08]

<http://www.kaputcenter.umassd.edu/products/software/smwcomp/download/> [cit. 2010 – 15 – 07]

**GLOBE Carbon Cycle**, stránky české části řešitelského týmu z PřF UK  
<http://kfrserver.natur.cuni.cz/globe/>

<http://www.sps-pi.cz/implementace-vyukoveho-softwaru-matlab> [cit. 2010 – 15 – 07]

**ICMI**, <http://www.mathunion.org/icmi/home> [cit. 2010 – 13 – 07]

**ICTMA**, <http://www.icmihistory.unito.it/ictma.php> [cit. 2010 – 13 – 07]

**Isee Systems**, <http://www.iseesystems.com/community/downloads/NetsimModels.aspx#3>  
[cit. 2010 – 03 – 07]

**MatLab**, <http://www.mathworks.com/products/matlab> [cit. 2010 – 15 – 07]

**OECD**, <http://www.oecd.org/home> [cit. 2010 – 15 – 07]

**Proverbs**, [www.proverbs.cz](http://www.proverbs.cz) [cit. 2010 – 20 – 08]

**RVP**, <http://clanky.rvp.cz> [cit. 2010 – 05 – 07]

**Systems Thinking in School**, <http://www.watersfoundation.com> [cit. 2010 – 17 – 07]

**Systems Thinking**, <http://www.systems-thinking.org/stada/stada.htm> [cit. 2010 – 03 – 07]

**The GLOBE Program**, <http://globe.gov/> [cit. 2010 – 23 – 08]

## 9. Příloha

### 9.1. Pracovní listy pro studenty

#### 9.1.1. Pracovní list 01 – Ppm

##### Koncentrace plynů v atmosféře

Koncentrace oxidu uhličitého a dalších látek v atmosféře se často uvádí v jednotkách ppm, neboť koncentrace některých plynů v ovzduší je velmi nízká. **Ppm** je zkratka z parts per million, tj. částí z milionu - jedna miliontina. Chceme-li zdůraznit, že se jedná o objemové jednotky, značíme **ppmv** (parts per million by volume). Chceme-li naopak zdůraznit, že se jedná o hmotnostní jednotky, značíme **ppmw** (parts per million by weight). Při sledování znečišťujících látek v ovzduší je často koncentrace látek vyjadřována jako ppmv (parts per million by volume). Toto vyjádření je vhodné zejména pro koncentrace plynů. Nicméně koncentrace ne-plynných látek, jako jsou aerosoly, tj. kapičky kapalné látky v plynu či drobné pevné částice v plynu a jednotlivé pevné látky v ovzduší, se běžněji uvádí jako  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Pro převod ppm na  $\text{mg}/\text{m}^3$  se musí využít konverzní faktor odvozený od molární hmotnosti daného plynu. Výpočet ovlivňuje teplota a tlak atmosféry.

1) Přečtěte si text výše a odpovězte na následující otázky.

a) Co znamená ppm?

.....

b) Proč se koncentrace plynů uvádí právě v těchto jednotkách?

.....  
.....

c) Jaký je rozdíl mezi jednotkami ppmv a ppmw?

.....  
.....

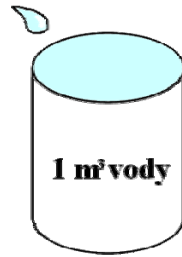
d) Kdy je vhodné uvádět koncentraci látek v ovzduší v jednotkách ppmv a ppmw?

.....  
.....

e) Jaké podmínky prostředí (faktory) ovlivňující převod jednotek?

.....  
.....

- 2) Podívejte se na následující analogie ppm (resp.ppmv a ppmw) a zodpovězte otázky.



- a) 1ppmv je jako kapka vody v objemu 1 m<sup>3</sup> vody (př. 1 cm<sup>3</sup> = 1 ml). Kolik ml představuje 1 kapka?

.....



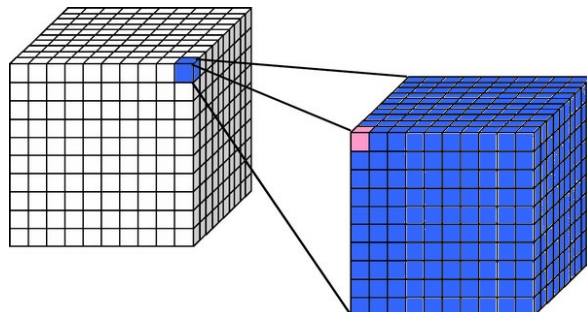
- b) 1 ppmw je jako jeden mg na jeden kg. Kolik mg představuje 1 kg?

.....



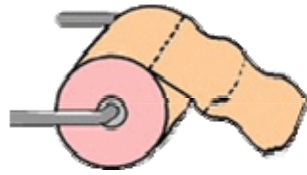
- c) 1 ppmw je jako špetka soli v 10 kg chipsů. Kolik mg váží špetka soli?

.....



- d) 1ppm je jako jedna kostička (růžová) mezi 10<sup>6</sup> kostiček. Kolik ppm představuje modrá kostička?

.....



- e) 1 ppm je jako jeden útržek toaletního papíru z hypotetické roličky, již bychom natáhli z Prahy do Strakonice. Jak je vzdálená vzdušnou čarou Praha od Strakonice, jestliže délka 1 útržku je 10 cm?

.....



- f) 1 ppm je jako jedna vteřina v přibližně 11,574 dnech. Kolik vteřin představuje 11,574 dní?

.....

## Převodní vztah ppmv na ppmw a %

V odborné literatuře vědci při prezentaci svých výsledků často využívají různé jednotky (ppm,  $\mu\text{mol/mol}$ ,  $\text{mg/m}^3$  apod.). Abychom se snáze orientovali v uváděných hodnotách a dokázali je mezi sebou porovnat, je užitečné znát převodní vztah mezi hlavními jednotkami. Pro převod ppm na  $\text{mg/m}^3$  se musí využít konverzní faktor odvozený od molární hmotnosti daného plynu. Výpočet ovlivňuje teplota a tlak atmosféry. Nejčastějšími podmínkami, za kterých se převod provádí, jsou tlak 1 atmosféra (101,325kPa) a teplota 25°C (298,15°K). Pro praktické účely můžete použít **Ppm konvertor**, který vám usnadní výpočty.

The screenshot shows the 'ppm konvertor' application window. It contains a text box at the top explaining the conversion process, a 'Zadávané parametry' section on the left with input fields for molecular weight, temperature, and concentration, and several conversion sections on the right. Red arrows point to specific elements: the help icon, the temperature input field, the 'Převod ppm na mg/m<sup>3</sup>' section, and an information dialog box that appears when a field is empty.

**Tlačítko Vás přenesse k informačnímu panelu, kde je vysvětlen převod mezi jednotkami ppm a  $\text{mg/m}^3$ .**

**Hodnotu musíme zadávat v předdefinovaném formátu.**

**Pokud zapomeneme vyplnit políčko důležité pro převod, objeví se informační box.**

**Lze vybrat, ve kterých stupních budeme teplotu zadávat.**

Pokud nicméně budete chtít přijít „na kloub“ převodním vztahům a budete si chtít výpočet ověřit, můžete si přečíst informační box níže a zkusit následující cvičení.



## INFORMAČNÍ BOX - PRO ZÁJEMCE

Pro převod se využívá následující vzorec

$$\left[ \frac{mg}{m^3} \right] = \frac{10^3 \cdot M \cdot p}{R \cdot T} [ppm], \text{ kde}$$

p ...atmosférický tlak (0.101325 Pa)

M ...molekulární hmotnost plynu (44,01 g/mol pro CO<sub>2</sub>)

R ...univerzální plynová konstanta ( 8.3145 m<sup>3</sup>·Pa/mol·K)

T ... teplota atmosféry (K).

Převodní vztah mezi °C a K je následující

$$[K] = [°C] + 273.15$$

Analogicky převedeme opačně

$$[ppm] = \frac{R \cdot T}{10^3 \cdot M \cdot p} \left[ \frac{mg}{m^3} \right]$$

Převod na procenta

Dále můžeme jednotky ppm vyjádřit procentuálně. Např. protože 10 ppm značí 10/10<sup>6</sup>, proto lze 10 ppm plynu vyjádřit jako 0,001% objemu vzduchu, tj.

$$x \text{ ppm} = \frac{x}{10^4} [\%]$$

### **3) Na základě vzorců spočítejte**

**a) Převed'te jednotky mg/m<sup>3</sup> na ppm při teplotě 25°C a 21°C**

.....  
.....

**b) Převed'te jednotky ppm na mg/m<sup>3</sup> při teplotě 25°C a 21°C.**

.....  
.....

**c) Vyjádřete 380, 7000 a 200 000 ppm procentuálně.**

.....  
.....

## 9.1.2. Pracovní list 02 – Vytvřej si

### Oxid uhličitý a zdraví člověka

*"Člověk je člověku ustavičným nebezpečím."*

*Lucius Annaeus Seneca*

Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) u člověka dramaticky ovlivňuje funkci hlavních vitálních procesů, včetně kontroly dechu, rozšíření/stažení cév (zejména mozkové tkáně) a pH tělesných tekutin. CO<sub>2</sub> je v krvi fyzikálně rozpuštěný nebo chemicky vázaný na hemoglobin. Primárně je přítomný v plazmě jako ion bikarbonátu. Při zvýšené hladině CO<sub>2</sub> v krvi dochází ke zrychlení a prohloubení dechu a snížení pH krve. Zvýšená koncentrace CO<sub>2</sub> v ovzduší nad určitou hranici nepříznivě ovlivňuje zdraví člověka, zejména dýchání. Přítom špatná kvalita vzduchu hrozí zejména u nových budov, které byly opatřeny, za účelem snížení teplených ztrát, dobře těsnícími okny, která však mají nedostatečnou infiltraci a oproti starším oknům nezajišťují dostatečnou výměnu vzduchu. Při hodnotách nad 5000 ppm má CO<sub>2</sub> na člověka toxické účinky. Jestliže dochází k vystavení koncentraci nad 30 000 ppm po dobu jedné hodiny, většina lidí trpí bolestmi hlavy, závratěmi a nevolností. K letargii a ztrátě vědomí dochází při 70 000 – 100 000 ppm. Smrtelná je koncentrace nad 170 000 ppm, kdy stačí expozice po dobu pouhé minuty. Zajímá vás, za jak dlouho se zvýší koncentrace CO<sub>2</sub> na nebezpečnou úroveň? Víte jaká je běžná koncentrace CO<sub>2</sub> ve venkovním prostředí a jaká v místnosti? Jaká je zákonem stanovená kvalita vzduchu? Nebo kolik litrů CO<sub>2</sub> průměrně člověk vydýchá za hodinu? Jak intenzivně je třeba větrat, abychom kvalitu vzduchu udrželi na požadované úrovni?

### Hodnoty použité v modelu

Běžná koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti je 600 – 900 ppm, zatímco ve venkovním prostředí se pohybuje okolo 330 – 370 ppm. Přítom průměrná hodnota CO<sub>2</sub> se v průběhu 24 hodin předpisuje na 1000 ppm. Zároveň by v průběhu 24 hodin nikdy neměla být překročena hodnota 1200 ppm, což je hodnota stanovená zákonem. Protože lidé stále produkují CO<sub>2</sub> dýcháním, je pro udržení kvality vzduchu interiéru potřeba pravidelně větrat. Člověk vydýchá průměrně 19 litrů CO<sub>2</sub> za hodinu. Hlavní příčinou zvyšování koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti je tedy, vedle dýchacích procesů, nedostatečné větrání a velikost prostoru. Klasická třída má objem vzduchu cca 160 -180m<sup>3</sup> a běžná obytná místnost přibližně 52 m<sup>3</sup> vzduchu.

## 1. Úloha: Struktura modelu

Projděte si svým tempem strukturu modelu, tak abyste pochopili, jak je model vybudován. Klikněte na tlačítko *Jak je to?* – viz Obr. 1 a zobrazí se vám vrstva *Story Telling*, která obsahuje strukturu modelu – viz Obr. 2. V příběhu se můžete pohybovat pomocí tlačítka *Enter*. Poznamenejte si slovně do tabulky z úlohy 1.1, jak jsou definovány vztahy jednotlivých procesů nebo proměnných.

### Oxid uhličitý a zdraví člověka



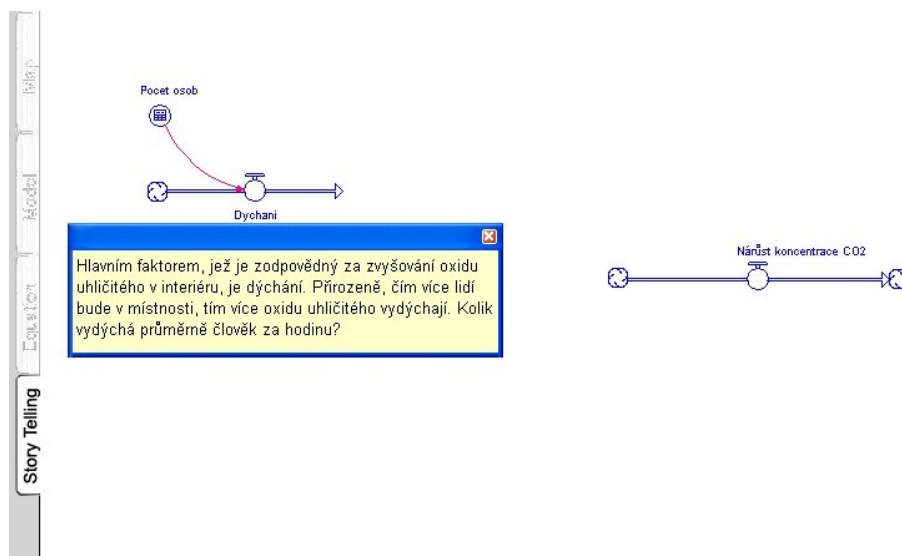
Oxid uhličitý u člověka dramaticky ovlivňuje funkci hlavních vitálních procesů, včetně kontroly dechu, rozšíření/stažení cév (zjm. mozkové tkáně) a pH tělesných tekutin. Zvýšená koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší nepříznivě ovlivňuje zdraví člověka. Při hodnotách nad 5000 ppm má oxid uhličitý na člověka toxické účinky - viz



Za jak dlouho se zvýší koncentrace oxidu uhličitého na nebezpečnou úroveň? Víte jaká je běžná koncentrace oxidu uhličitého ve venkovním prostředí a jaká v místnosti? Jaká je standardní kvalita vzduchu? Nebo kolik litrů oxidu uhličitého vydýchá průměrně člověk za hodinu? Jak intenzivně je třeba větrat, abychom kvalitu vzduchu udrželi? Jakou nevýhodu mají dobře těsnící okna zabráňující tepelným ztrátám?



Obr.1 Úvodní stránka, která se zobrazí při otevření modelu *Vyvětrej si!*



Obr. 2 Vrstva *Story Telling* obsahující strukturu modelu

### 1.1. Zapsání vztahů

Proces/proměnná	Vztah	Jednotky
Dýchání	Počet osob · produktivita dýchání	l/h
Koncentrace vydýchaného CO <sub>2</sub> v místnosti		
Vzrůst koncentrace CO <sub>2</sub>		
Intenzita větrání		

### 1.2. Odvození obecného vzorce

1.2.1 Odvodte na základě těchto vztahů obecný vzorec pro výpočet vzrůstu koncentrace CO<sub>2</sub> v závislosti na velikosti místnosti a objemu vydýchaného CO<sub>2</sub>.

A) Doplňte tabulku, ve které si označíme veličiny pro snazší manipulaci s nimi v další práci.

Označení	Veličina	Jednotky
P	produktivita dýchání	
t	čas	
V <sub>vzduch</sub>	objem vzduchu v místnosti	
V <sub>vyd(t)</sub>	objem vydýchaného CO <sub>2</sub> v čase t	
C <sub>vyd(t)</sub>	koncentrace vydýchaného CO <sub>2</sub> v místnosti v čase t	
C <sub>CO2(t<sub>0</sub>)</sub>		
C <sub>CO2(t)</sub>		

B) Nyní přepište vztahy z úlohy 1.1. do jazyka matematiky pomocí označení, která jsou tabulce výše a zkontrolujte konzistenci jednotek.

Objem vydýchaného CO<sub>2</sub> v čase t

.....

Koncentrace vydýchané CO<sub>2</sub> v místnosti

.....

Nárůst koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti

.....

**C) Dosazením do posledního vztahu napište obecný vzorec pro výpočet koncentrace oxidu uhličitého v čase t.**

.....

**1.2.2 Odvod'te dále vzorec na výpočet objemu vzduchu, který je nutno přivést z venku, abychom udrželi kvalitu vzduchu v interiéru na požadovaného hodnotě.**

**A) Doplňte tabulku, ve které si označíme veličiny pro snazší manipulaci s nimi v další práci.**

Označení	Veličina	Jednotky
x	neznámý objem přiváděného vzduchu za čas t	
V <sub>CO2</sub>	objem škodlivin (CO <sub>2</sub> ) vydýchaného za čas t	
V <sub>ven</sub>	objem škodlivin (CO <sub>2</sub> ) jdoucí ven	
V <sub>dovnitř</sub>		
c <sub>max</sub>		
c	koncentrace CO <sub>2</sub> ve venkovním přiváděném vzduchu	

**B) Vyjádřete následující vztahy v jazyce matematiky**

Objem škodlivin jdoucích ven

.....

Objem škodlivin jdoucích dovnitř

.....

Vztah mezi objemem škodlivin jdoucím ven a dovnitř

.....

**C) Vyjádříme neznámou x**

.....

### 1.3. Závěr

Jaké má obecný vzorec výhody a nevýhody?

.....

.....

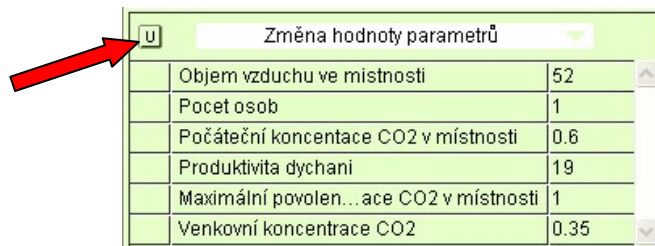
Jak by se dal proces zvyšování oxidu uhličitého v místnosti modelovat na základě znalosti obecného vzorce z úlohy 1.2.A? V čem se obě pojetí modelu (1. založené na obecné rovnici, 2. založené na více rovnicích) odlišují s ohledem na strukturu?

.....

.....

## 2. Úloha: Simulace – změna parametrů a získávání informací z tabulky

Výpočtem nebo simulací získejte informace a odpovězte na následující otázky. Hodnoty parametrů můžete měnit v *Tabulce pro změnu hodnoty parametrů*. Chceme-li hodnoty nastavit na původní hodnotu, musíme kliknout na písmeno *U* vlevo nahoře v tabulce.



Změna hodnoty parametrů	
Objem vzduchu ve místnosti	52
Pocet osob	1
Počáteční koncentrace CO2 v místnosti	0.6
Produktivita dychani	19
Maximální povolen...ace CO2 v místnosti	1
Venkovní koncentrace CO2	0.35

Mějme místnost o rozměrech  $(4 \times 5 \times 2,6)$ (m) a počáteční koncentrací 600 ppm.

2.1. O kolik se zvýší ppm v místnosti za jednu, dvě, tři... hodiny, je-li obsazena pouze jedním člověkem?

.....

.....

.....

2.2. Za jak dlouho by se koncentrace oxidu uhličitého zvýšila nad maximální zákonem stanovenou hodnotu, pokud by se nevětralo a okna by byla dobře izolovaná?

.....

.....

.....

2.3. Za jak dlouho se zvýší koncentrace oxidu uhličitého v dané místnosti na hodnotu, jež způsobí během minuty bezvědomí a smrt?

.....

.....

.....

**2.4. Kolik osob by muselo být v místnosti, aby se vyčerpala čerstvý vzduch (tj. aby hodnota CO<sub>2</sub> dosáhla 170 000 ppm) již během jednoho dne?**

.....  
.....  
.....

**2.5. Kolik m<sup>3</sup>/h venkovního vzduchu potřebujete, abyste udrželi kvalitu vzduchu v místnosti na 1000 ppm, je-li v místnosti pouze jedna osoba?**

.....  
.....  
.....

**3. Úloha: Simulace – změna parametrů a získávání informací z grafu**

**3.1. Rozhodněte, zda poroste koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti rychleji v malé nebo velké místnosti. Svou hypotézu zdůvodněte a dokažte na grafu.**

.....  
.....  
.....

**3.2. Jakým způsobem ovlivní počáteční koncentrace CO<sub>2</sub> rychlost růstu koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti? Svou hypotézu zdůvodněte a ověřte na grafu.**

.....  
.....  
.....

**3.3. Jak se změní objem přiváděného venkovního vzduchu potřebného pro udržení kvality vzduchu interiéru, pokud se kvalita venkovního vzduchu zhorší na 390 ppm? Svou hypotézu zdůvodněte a ověřte na grafu.**

.....  
.....  
.....

**3.4. Jak se změní objem potřebného venkovního vzduchu nutný po udržení kvality vzduchu interiéru, pokud zpřísníme normy a budeme požadovat maximální povolenou koncentraci CO<sub>2</sub> v místnosti 1000 ppm. Svou hypotézu zdůvodněte a ověřte na grafu.**

.....  
.....  
.....

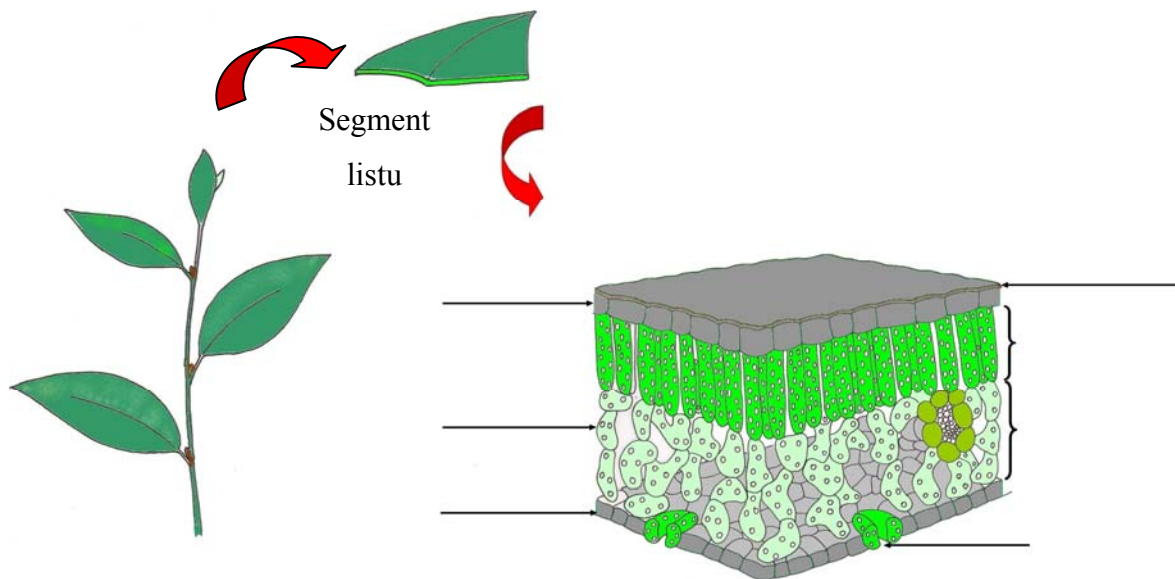
### 9.1.3. Pracovní list 03 – Cesta do hlubin

*V této části si zopakujeme nebo doplníme vědomosti o stavbě a funkci listu, buňky a chloroplastu, abychom si uvědomili, který rostlinný orgán zodpovídá za fotosyntézu a kde přesně fotosyntéza probíhá. Budeme se tak dostávat stále hlouběji do struktury rostliny. Nejprve se podívejme na rostlinu jako celek.*

#### Stavba listu – funkce jednotlivých částí

- 1) Pokud bychom udělali příčný řez listem a prohlédli si ho pod mikroskopem, objevili bychom vnitřní struktury, které jsou zobrazené na obrázku (platí pro dvouděložné rostliny rostoucí na souši). Přírozeně nás začne zajímat, k čemu jednotlivé struktury slouží.

- a) Nejprve tyto struktury pojmenujte.



- b) Doplněte následující text pojednávající o funkci jednotlivých částí listu.

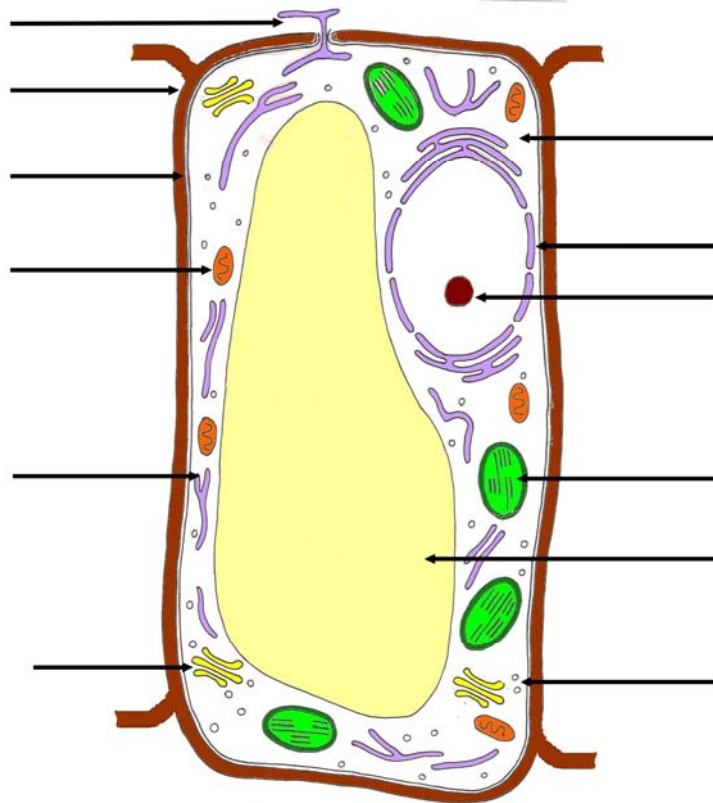
Svrchní pokožka (epidermis) poskytuje.....listu a bývá kryta kutikulou, která zabraňuje ztrátám ..... a snižuje průnik patogenů. Pod svrchní pokožkou se nachází palisádový parenchym, který se skládá z podlouhlých buněk orientovaných kolmo k pokožce listu. Architektura těchto buněk usnadňuje proniknutí.....do nižších vrstev listu a probíhá zde ..... Houbový parenchym pod parenchymem palisádovým je tvořen buňkami nepravidelného tvaru, které jsou též místem.....oxidu uhličitého. Spodní pokožka obsahuje průduchy, které zajišťují ..... mezi vnitřním a vnějším prostředím. Otevíráním a zavíráním průduchů rostlina reguluje příjem..... a výdej.....ve formě.....



## Stavba rostlinné buňky – funkce jednotlivých organel

2) Nyní vidíme, že se naše pozornost musí obrátit více do nitra rostlinné buňky, abychom nahlédli, co se děje uvnitř.

a) Nejprve si prohlédněte obecnou rostlinnou buňku na obrázku, popište její části.



b) Přiřad'te k jednotlivým číslům klíčové pojmy označené velkými a malými písmeny. Svůj výběr odůvodněte.

- |                              |                  |            |
|------------------------------|------------------|------------|
| 1. Buněčná stěna             | A) DNA           | a) Brnění  |
| 2. Cytoplasma                | B) Energie       | b) Dělení  |
| 3. Endoplasmatické retikulum | C) Enzymy        | c) Olej    |
| 4. Chloroplast               | D) Lipidy        | d) Maso    |
| 5. Jádro                     | E) Oxid uhličitý | e) Reakce  |
| 6. Mitochondrie              | F) Pevnost       | f) Redbull |
| 7. Plasmatická membrána      | G) Proteiny      | g) Telefon |
| 8. Ribosomy                  | H) Signály       | h) Továrna |
| 9. Vakuola                   | I) Zásobárna     | i) Voda    |
|                              |                  | j) Kosti   |

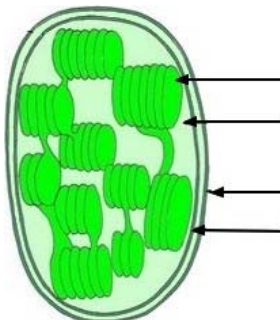
**Odůvodnění:**

- 1.....
- 2.....
- 3.....
- 4.....
- 5.....
- 6.....
- 7.....
- 8.....
- 9.....

**Stavba chloroplastu – funkce jednotlivých kompartmentů**

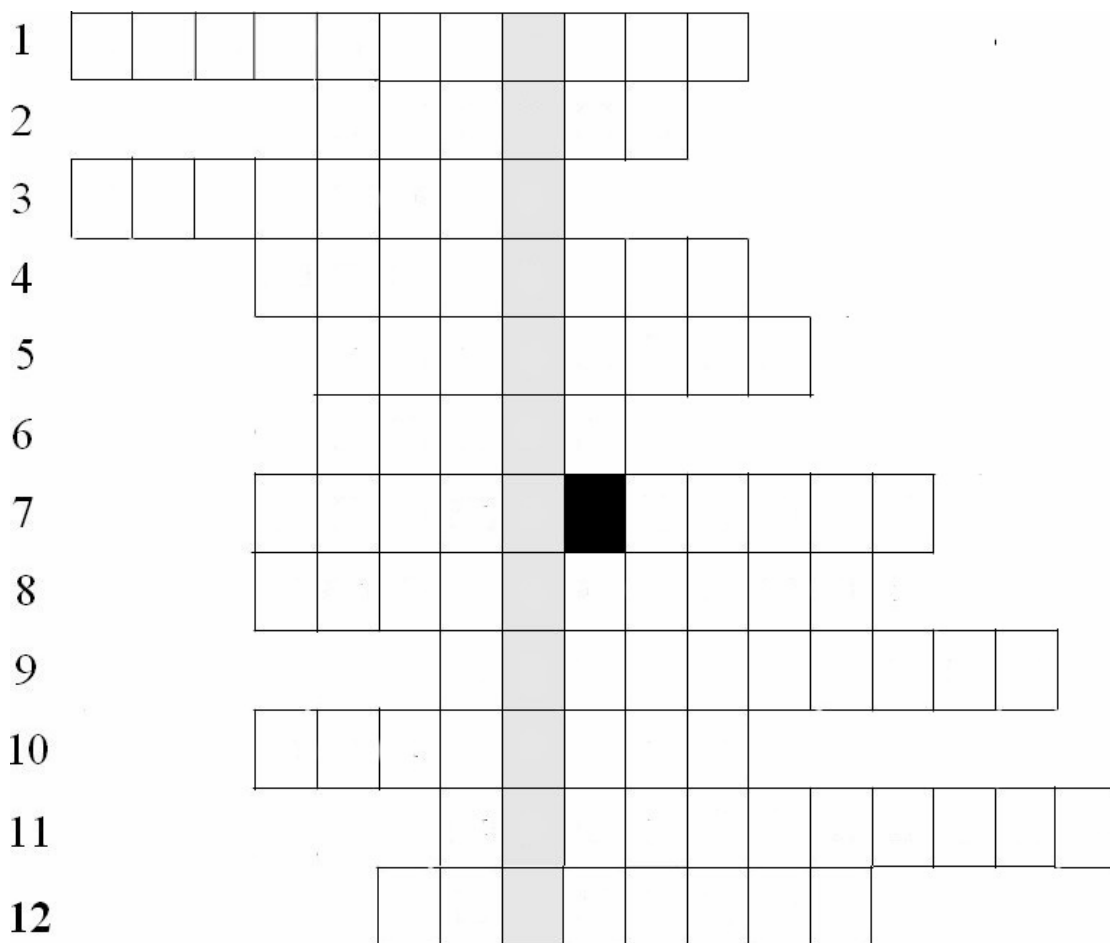
3) Ujasnili jsme si, ve které organelle fotosyntéza probíhá a můžeme se podívat hlouběji do její struktury. Pomocí upraveného výňatku z článku v časopisu Vesmír (viz příloha) zodpovězte následující otázky.

a) Z jakých strukturních částí se chloroplast skládá? Popište obrázek níže.



**b) Označení *tylakoid* pochází z řečtiny a označuje: „...“ (viz tajenka křížovky).**

1. Molekuly, které tvoří hlavní složku biologických membrán.
2. Kompartment chloroplastu, ve kterém probíhá fixace oxidu uhličitého.
3. Specializovaná fotosyntetická membrána tvořící váčkovitou strukturu.
4. Zelené barvivo rostlin.
5. Struktura, kterou mají jak mitochondrie, tak chloroplasty a vakuoly.
6. Shluky tylakoidů.
7. Vzhled tylakoidu.
8. Proces, kterým vznikají tylakoidní membrány z vnitřní membrány plastidů
9. Nezelená fotosyntetická barviva u řas (ne karotenoidy).
10. Fotosyntetické organely.
11. Zelené fotosyntetické organely.
12. Název procesu, který je vázán na fotosyntetické membrány.



## **Příloha:**

KUTÍK J.: *Tylakoidní membrána, sídlo fotosyntézy*. Vesmír 75, 33, 1996/1.

(<http://www.vesmir.cz/clanek/tylakoidni-membrana-sidlo-fotosyntezy>)

*Fotosyntetická membrána je struktura, na kterou jsou primární procesy fotosyntézy vázány. U rostlin, které při fotosyntéze rozkládají vodu a uvolňují kyslík, jsou v buňkách diferencovány specializované fotosyntetické membrány, zvané tylakoidní. Tylakoidní membrána je tvořena, podobně jako jiné buněčné membrány, dvojvrstvou lipidů, do které jsou jako v tekuté mozaice zabudovány bílkoviny. S těmi jsou pak spojeny další látky, např. barviva, zejména chlorofyly.*

*U všech eukaryotických řas a u vyšších rostlin vznikají tylakoidní membrány vchlipováním vnitřní obalové membrány fotosyntetických organel – plastidů. U zelených řas a vyšších rostlin jsou tyto plastidy zelené a nazývají se chloroplasty. Díky přítomnosti těchto membrán jsou rostliny zelené. U jiných skupin řas (např. u ruduch nebo hnědých řas) je zelená barva chlorofylů v plastidech překryta jinými barvivy (karotenoidy, fykobiliny).*

*Tylakoid jsou ploché váčky. Jsou tvořeny tylakoidními membránami, jejichž tloušťka se pohybuje okolo šesti nanometrů. Složkami tylakoidních membrán jsou mj. dva typy chlorofylbílkovinových komplexů. Molekuly chlorofylu v reakčních centrech obou komplexů mají schopnost přenášet elektrony (odebírané z molekul vody) přes tylakoidní membránu, proti potenciálovému spádu. Oddělení elektrických nábojů v reakčních centrech je vlastní podstatou fotosyntetické přeměny energie. Pro každé reakční centrum sbírá (soustřeďuje) zářivou energii několik stovek molekul chlorofylů a dalších barviv, karotenů a xantofylů, tvořících ve vazbě na bílkoviny světlosběrné komplexy fotosystémů.*

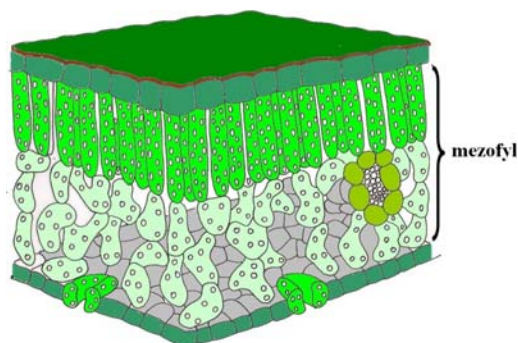
*Stroma je kompartment chloroplastu, ve kterém jsou tylakoidy uloženy. Zde probíhá fixace oxidu uhličitého a další „temnotní“ reakce fotosyntézy. Většina tylakoidů neleží ve stromatu volně, jednotlivě, ale tvoří shluky – grana. V granech jsou jednotlivé okrouhlé tylakoidy, někdy nazývané „disky“, k sobě pevně přitisknuty. Grana jsou vzájemně propojena protáhlými intergranálními tylakoidy.*

*(Kutík 1996, výňatek, upraveno v české terminologii)*

#### 9.1.4. Pracovní list 04 – Ozáření a oxid uhličitý

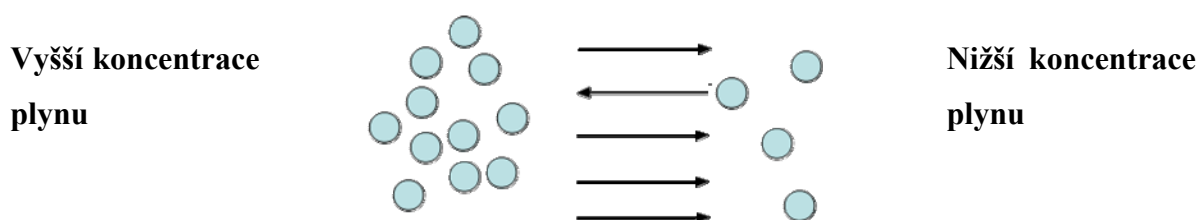
##### Úvod

Zvyšování biomasy rostlin je v úzkém vztahu s dostupností oxidu uhličitého. Fotosyntetická asimilace oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) je zabudování uhlíku z molekuly  $\text{CO}_2$  do molekul sacharidů a uskutečňuje v pletivech obsahujících chloroplasty, mezofylu – viz Obr.1.



Obr. 1 Řez listem Rostliny C3<sup>27</sup>

Oxid uhličitý vstupuje z atmosféry do listů průduchy po koncentračním spádu, který je dán rozdílem koncentrací  $\text{CO}_2$  v okolí a uvnitř listu. Spontánní pohyb částic v prostoru po koncentračním spádu (z oblasti o vyšší koncentraci látky do místa o nižší koncentraci látky) se nazývá **difúze** – viz Obr. 1. **Vodivost** můžeme chápat jako rychlost, kterou se molekuly oxidu uhličitého přemístí z okolí do místa fixace  $\text{CO}_2$  v chloroplastu přes řadu „překážek“ na cestě.



Obr. 2 Difúze plynu z místa o vyšší koncentraci látky do místa o nižší koncentraci. Kruhy odpovídají molekulám plynu. Šipky směru difúze.

Zabudování oxidu uhličitého do organických sloučenin však vyžaduje energii, energii poskytovanou slunečním zářením. **Záření** je šíření energie prostorem. Základní jednotkou záření je foton. Kvantem rozumíme množství světelné energie nesené jedním fotonem. Přitom energie záření je závislá na vlnové délce a udává se v jednotkách joule (J). Elektromagnetické záření, které je vnímatelné lidským okem se nazývá **světlo**. Jde o oblast v rozsahu vlnových délek 380 – 780 nm. Oblast elektromagnetického záření, v níž je rozložena absorpce asimilačních pigmentů a která vyvolává v rostlinné buňce proces fotosyntézy, se nazývá **fotosynteticky aktivní radiací** (FAR). Jde o oblast elektromagnetického záření v rozsahu vlnových délek 400 – 700 nm.

<sup>27</sup> Obr. byl zhotoven Mgr. Drahomírou Bartákovou a dále upraven ve PhotoFiltre.

Záření dopadající na jednotku plochy libovolně orientované ke směru záření se nazývá **ozářenost** a závisí na oblačnosti a čistotě ovzduší, dále pak na úhlu dopadu slunečních paprsků, tj. na zeměpisné šířce, ročním období a denní době. **Kvantový výtěžek** vyjadřuje počet molů fixovaného oxidu uhličitého při využití jednoho molu fotonů.

### **Hodnoty použité v modelu**

Běžná atmosférická koncentrace CO<sub>2</sub> se pohybuje okolo 386 ppm, zatímco koncentrace oxidu uhličitého uvnitř listu činí 70% koncentrace v atmosféře (Loreto 1992). Dodávka atmosférického oxidu uhličitého není dostatečná, aby bylo dosaženo nasycení fotosyntézy – mnohé rostliny dosahují nasycení až při 1000 ppm (Larcher 2003). V modelu se pracuje s jednotkami g(C)/m<sup>3</sup>, kdy 1000 ppm odpovídá 0.49 g(C)/m<sup>3</sup>. Model operuje na intervalu 0.1 – 0.65 g(C)/m<sup>3</sup>, kdy maximální hodnota odpovídá přibližně 1500 ppm.<sup>28</sup> Maximální průduchová (stomatální) vodivost je 0,002 – 0,009 m/s (Nobel 2009).

Oxid uhličitý vstupuje do listů z atmosféry a je v mezofylových buňkách listu enzymaticky fixován do molekul sacharidů. Metabolické dráhy fixace oxidu uhličitého závisejí na množství energie, které je listem absorbováno. Intenzita záření přitom závisí na úhlu dopadu slunečních paprsků na povrch listu. Na povrch vegetace dopadá při jasné obloze průměrně 500 – 1000 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> a při zatažené obloze 50 – 200 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Model umožňuje nastavit hodnoty ozářenosti od 50 – 1000 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>.

Podíl záření, který se zúročí ve fotosyntéze, vyjadřuje hodnota kvantového výtěžku. Předpokládáme-li potřebu 20 kvant pro redukci jednoho CO<sub>2</sub>, dostáváme kvantový výtěžek 0.05 mol(CO<sub>2</sub>)/mol(foton). Pro zachování konzistence jednotek, je tato hodnota převedena na 3.41 · 10<sup>-6</sup> g(C)/J(energie)<sup>29</sup>.

---

<sup>28</sup> Pro bližší vysvětlení převodních vztahů viz pracovní list Ppm a Ppm konvertor.

<sup>29</sup> Pro bližší vysvětlení převodních vztahů viz model a převaděč jednotek Quantum Yield.

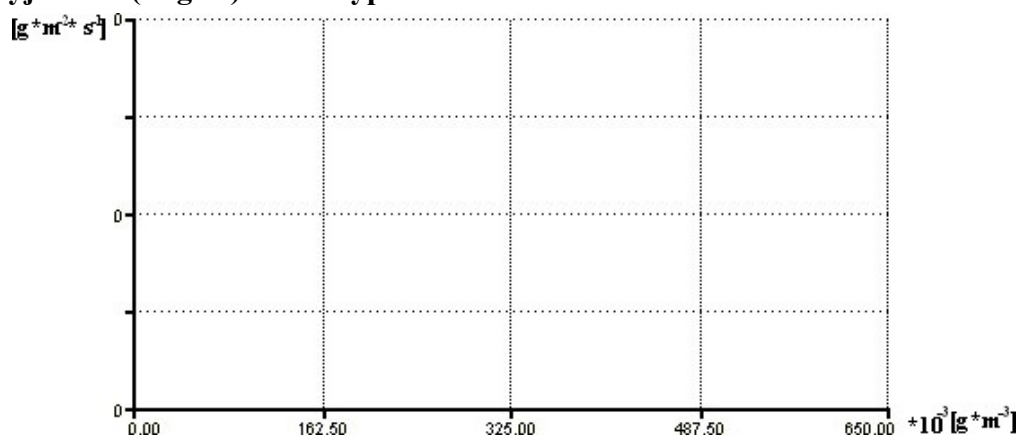
## 1. Úloha: Struktura modelu

Projděte si svým tempem strukturu modelu (klikněte na tlačítko *Jak je to?*), tak abyste pochopili, jak je model vybudován (v příběhu se pohybujte pomocí tlačítka *Enter*).

## 2. Úloha: Simulace – vliv oxidu uhličitého na rychlost fotosyntézy při změně ozáření

### 2.1. Závislost rychlosti fotosyntézy na koncentraci oxidu uhličitého při změně ozáření

#### 2.1.1 Vyslovte domněnku o závislosti rychlosti fotosyntézy na oxidu uhličitém a graficky vyjádřete (Page 2). Svou hypotézu zdůvodněte.



.....

.....

.....

Nyní můžete hypotézu ověřit simulací. Klikněte na tlačítko **Fotosyntéza** a poté na **Spustit**. Případné rozdíly se pokuste vysvětlit.

.....

.....

.....

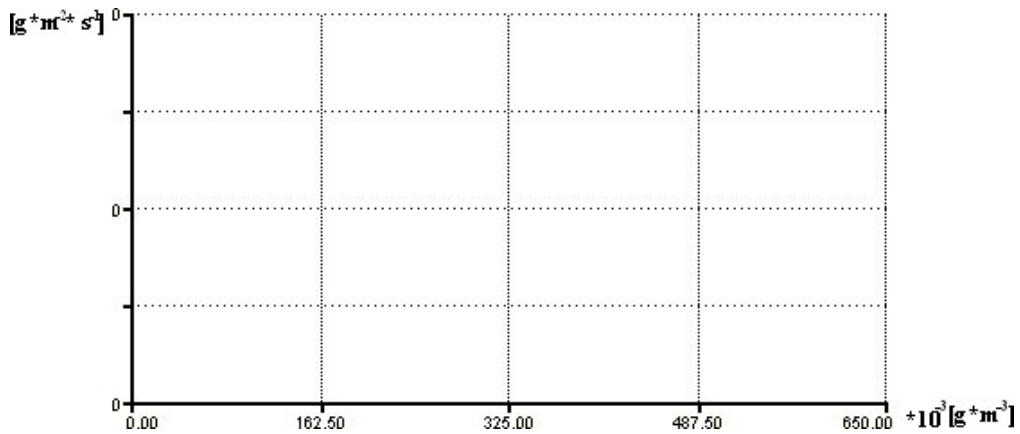
#### 2.1.2 Jak na grafu poznáme, že dochází k saturaci fotosyntézy oxidem uhličitém?

.....

.....

.....

#### 2.1.3 Jak se změní saturace fotosyntézy oxidem uhličitém, pokud budeme zvyšovat ozáření? Svou hypotézu zdůvodněte.



.....

.....

.....

Nyní můžete hypotézu ověřit simulací. Případné rozdíly se pokuste vysvětlit.

.....

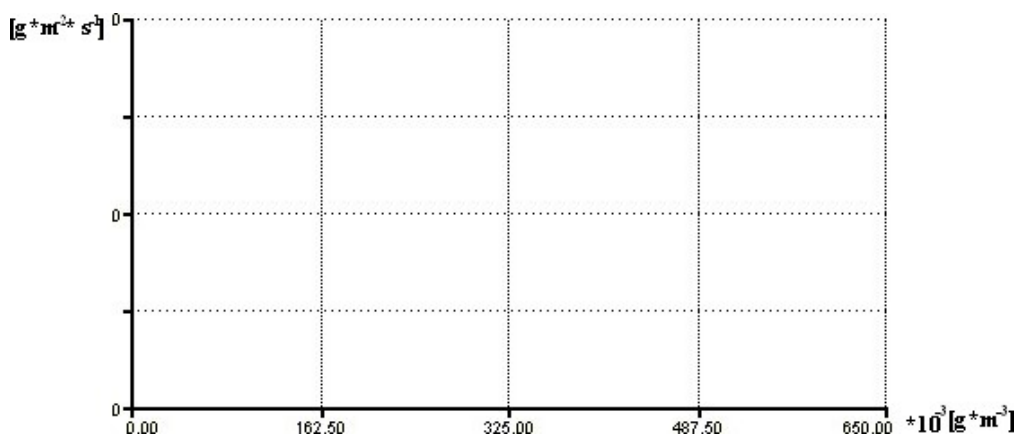
.....

.....

## 2.2. Vodivost

Vodivost můžeme chápat jako rychlost, kterou se molekuly CO<sub>2</sub> přemístí z okolí do místa fixace CO<sub>2</sub> (karboxylace) v chloroplastu přes řadu „překážek“ neboli odporů na cestě. Hodnoty vodivosti se pohybují v rozmezí 0.002 – 0.009 [m/s]. Uvažujme průměrnou ozářenost při zatažené obloze, tj. 150 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>.

**2.2.1 Vyslovte hypotézu, jak se bude měnit hodnota saturace fotosyntézy oxidem uhličitým při změně vodivosti a zdůvodněte.**





.....  
.....  
.....

**2.2.2 Nastavte postupně různou hodnotu vodivosti na intervalu 0.002 – 0.009 a pozorujte na grafu, jak se změní hodnota saturace fotosyntézy oxidem uhličitým. Jaké nepřesnosti ve vašem uvažování simulace odhalila?**

.....  
.....  
.....

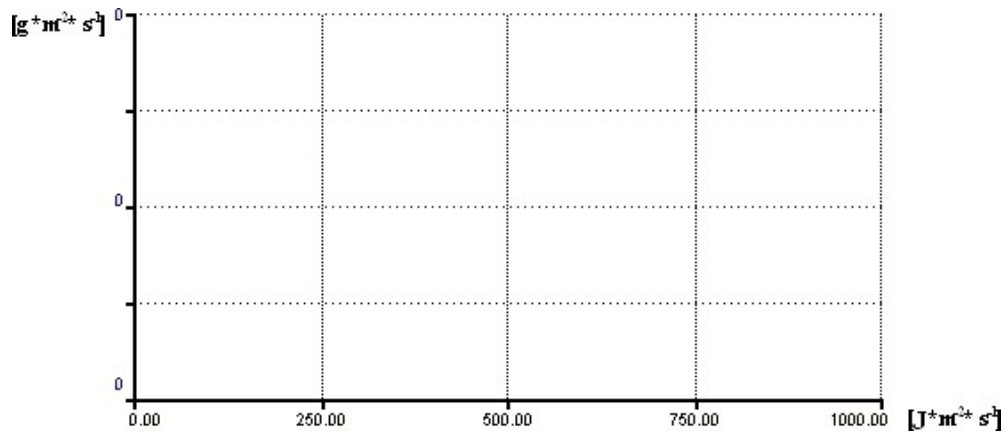
**2.2.3 Jak se změna vodivosti projevuje na grafu?**

.....  
.....  
.....

**3. Úloha: Simulace – vliv ozáření na rychlost fotosyntézy při změně koncentrace oxidu uhličitého**

**3.1. Závislost rychlosti fotosyntézy na ozáření při změně koncentrace oxidu uhličitého**

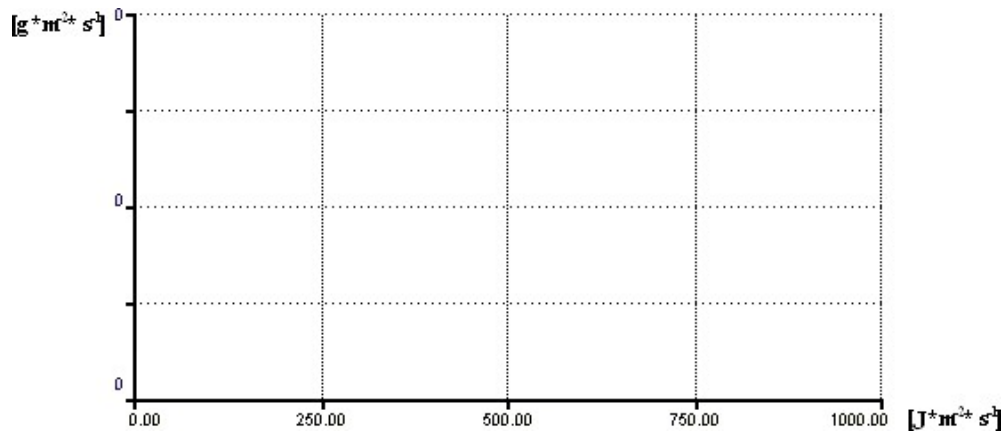
**3.1.1 Vyslovte domněnku o závislosti rychlosti fotosyntézy na ozáření a graficky vyjádřete (Page 2). Svou hypotézu zdůvodněte.**



.....  
.....  
.....

**Nyní můžete hypotézu ověřit simulací. Případné rozdíly se pokuste vysvětlit.**

.....  
 .....  
 .....  
**3.1.2 Jak se mění saturační hodnota světla pokud budeme zvyšovat hodnotu koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře nad běžnou hodnotu až po 1500 ppm (0.65g(C)/m<sup>3</sup>). Svou hypotézu zdůvodněte.**



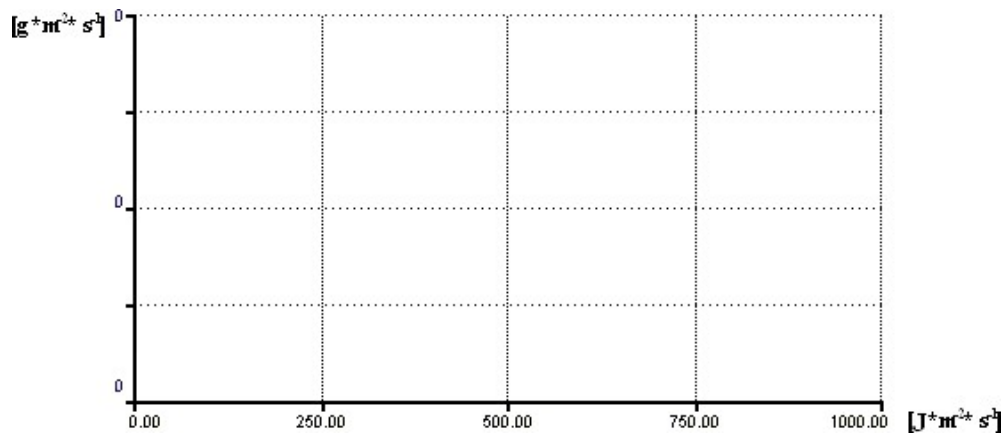
.....  
 .....  
 .....  
**Nyní můžete hypotézu ověřit simulací. Případné rozdíly se pokuste vysvětlit.**

.....  
 .....  
 .....  
**3.1.3 Listy, které se vyvíjely za vysoké ozáření (např. listy horních pater porostu) mívají hodnotu saturace fotosyntézy světlem vyšší (okolo 200 – 250 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), než listy, které se vyvíjely při nižší ozáření, např. listy ve spodních vrstvách porostu (okolo 100 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>). Čím jsou tyto rozdíly dány?**

.....  
 .....  
 .....  
**3.2. Kvantový výtěžek**

Teoretický počet kvant pro fixaci 1 molu CO<sub>2</sub> (44 g CO<sub>2</sub>) byl spočítán na 8 kvant, což představuje kvantový výtěžek 8.53 · 10<sup>-6</sup> g(C)/J(energie). Přitom se předpokládá, že kvanta jsou beze zbytku využita. Reálnější by nicméně bylo počítat s 20 kvanty světla, což představuje výtěžek 3.41 · 10<sup>-6</sup> g(C)/J(energie).

**3.2.1 Vyslovte hypotézu, jak se bude měnit hodnota, při které dojde k saturaci fotosyntézy světlem, pokud budeme zvyšovat hodnotu kvantového výtěžku. Svou hypotézu zdůvodněte.**



.....

.....

.....

**3.2.2 Nastavte postupně různou hodnotu vodivosti na intervalu 3.41 – 8.53 a na grafu pozorujte, jak se změní hodnota saturace fotosyntézy oxidem uhličitým. Jaké nepřesnosti ve vašem uvažování simulace odhalila?**

.....

.....

.....

**3.2.3 Jak se změna kvantového výtěžku projevuje na grafu?**

.....

.....

.....

**3.3. Fáze fotosyntézy**

**3.3.1 Rozlišujeme dvě fáze fotosyntézy. Které to jsou a co je jejich podstatou?**

.....

.....

.....

**3.3.2 Projevují se tyto dvě fáze nějakým způsobem na grafu? Které části grafu případně jednotlivým fázím fotosyntézy odpovídají?**

.....

.....

.....

**3.3.3 Interpretujte křivku závislosti rychlosti fotosyntézy na ozáření na základě výše provedených závěrů.**

.....  
.....  
.....

**3.3.4 Rozhodněte, které rostliny mají vyšší saturační bod: a) Rostliny C4, b) Rostliny C3. Proč?**

.....  
.....  
.....

## 9.2. Metodické manuály pro učitele

### 9.2.1. Metodický manuál 01 – Ppm

#### Metody a pomůcky

##### Cíl

Pochopit převodní vztahy mezi jednotkami koncentrace plynů a uvědomit si, ve kterých případech je vhodné dané jednotky použít.

##### Výstupy

- Student vysvětlí, co je ppm a uvede příklady.
- Zdůvodní, proč se jako jednotky koncentrace plynů v ovzduší uvádí právě jednotky ppm.
- Vysvětlí rozdíl mezi ppmv a ppmw.
- Uvede případy, kdy je vhodné uvádět koncentraci v jednotkách ppmv, resp. ppmw. (Vyjmenuje faktory ovlivňující převod jednotek a převede ppm na ppmw, resp. % a obráceně).

##### Metodika

- A) Student si přečte text vysvětlující ppm jednotky. Na základě informací v textu zodpoví otázky 1 – 2.
- B) Učitel upozorní studenty na skutečnost, že různí autoři uvádějí hodnoty v různých jednotkách, a na možnost využití *Ppm konvertoru*, v případě potřeby převodu mezi jednotkami ppmn a  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  a obráceně. Pro studenty, kteří by měli zájem o pochopení převodního vztahu, může učitel uvést rovnici a nechat studenty splnit cvičení 3.

##### Časová náročnost

max. 30 minut

##### Pomůcky

- Kalkulačka, ppm konvertor.
- Pro spuštění *Ppm konvertoru* je třeba mít nainstalovaný **dotnetfx.exe verze 2.0**, který je volně stažitelný na stránce:

<http://www.microsoft.com/downloads/details.aspx?FamilyID=0856EACB-4362-4B0D-8EDD&displaylang=en>

##### Literatura

1. SATTERFIELD, Z.: *What does ppm or ppm mean?* NESC Engineering Scientist: 2004, p. 38 – 40.
2. <http://www.travelmath.com/flight-distance>
3. <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2004-101/calc.htm>

## Řešení

1.

a) parts per million,

b) koncentrace plynů je velmi nízká,

c) ppmv, resp. ppmw – zdůraznění, že se jedná o objemové, resp. hmotnostní jednotky

d) ppmv, resp. ppmw – vhodnější pro plynné látky, resp. hrubé částice (saze, prach), drobné částice kovu nebo jemné částice solí .

e) teplota a tlak

2. a) 1 ml,      b)  $1\text{kg} = 10^6\text{ mg}$ ,      c) 10 mg,      d) 1000 ppm, e) 100 km, f)  $10^6$  vteřin,

3. a)  $1.8\text{ mg/m}^3$ ,  $2.14\text{ mg/m}^3$ ,      b) 0.47 ppm, 0.56ppm,      c) 0.038 %, 0.7%, 20 %

## 9.2.2. Metodický manuál 02 – Vyvětrej si

### Metody a pomůcky

#### Cíl

- Cílem je ukázat vliv oxidu uhličitého na zdraví člověka – zjistit, jaké koncentrace mu způsobují potíže.
- Zlepšení matematických schopností (čtení z tabulek nebo grafu lineární funkce, odvození obecného vzorce) a uvědomit si, že matematika není jen produktem, ale také procesem.
- Procvičit závěrečnou fázi modelování – simulaci (tvorbu a ověřování hypotéz). Ukázat rozdíl mezi dynamickým a statickým pojetím modelu.

#### Výstupy

- Biologie: Student uvede zdravotní účinky CO<sub>2</sub> na člověka, dále uvede průměrnou, předepsanou a maximální koncentraci CO<sub>2</sub> v místnosti a minimální toxickou a smrtelnou hladinu CO<sub>2</sub>.
- Matematické dovednosti: Student odvodí obecný vzorec pro výpočet změny koncentrace oxidu uhličitého v místnosti v čase a vzorec pro výpočet objemu vzduchu potřebného k udržení kvality vzduchu interiéru.

#### Metodika

##### Příprava na modelování

Studentům je prezentováno téma *Modelování ve výuce* (v softwaru Stella) v PowerPointové prezentaci, kde se seznámí s významem modelování ve výuce a modelování v softwaru Stella. Student je upozorněn na stereotypy v myšlení, a jak je Stella pomáhá překonávat.

##### Samotné modelování

- A) Student si přečte motivační text *Oxid uhličitý a zdraví člověka*. Je upozorněn, že hodnoty zadané v modelu nejsou libovolné, ale vycházejí z reality a skutečných měření. Použité hodnoty jsou shrnuty v textu *Hodnoty použité v modelu*.
- B) Samostatná práce na PC – student plní první část **úlohy 1**, kdy si projde si strukturu modelu v části modelu, *Story Telling*. Přejít do této části je možný z vrstvy *Interface* kliknutím na tlačítko *Jak je to?* V příběhu se může student pohybovat pomocí tlačítka *Enter*. V rámci **úlohy 1.1** zaznamená slovně vztahy mezi procesy, na které je upozorněn v části *Story Telling*.
- C) Kolektivní práce – studenti plní druhou část **úlohy 1**, kdy se společně pokusí odvodit v rámci **úlohy 1.2** obecný vzorec. V **úloze 1.3**, učitel vysvětlí, jakou důležitou skutečnost nám cvičení 1.2 demonstruje. Může se pokusit k závěru dospět spolu se studenty, proto jsou otázky formulované v závěru jako otázky k zamyšlení, nikoli jako úloha.
- D) Samostatná práce při simulaci – studenti plní úlohy ve spolupráci s výstupy modelu v tabulkové podobě. Do této části se přesunou z části *Story Telling* kliknutím na modrou šipku.

**Úloha 2:** Student mění hodnoty parametrů v *Tabulce pro změnu parametrů*. Hodnoty nastavíme na původní hodnotu zmáčknutím písmene *U* (vlevo nahoře v tabulce pro změnu parametrů). Než student přejde k plnění úlohy 3, nastaví hodnoty na původní a klikne na tlačítko *Vymaž*.

E) Diskuse – tvorba a zdůvodnění hypotéz, testování hypotéz a dokazování na grafu.

**Úloha 3:** Studenti nejprve vysloví hypotézu a svůj názor odůvodní. Poté ověří svou hypotézu na grafu.

### **Časová náročnost**

60 minut

### **Pomůcky**

Kalkulačka

### **Literatura**

1. DOLEŽÍLKOVÁ, H.: *Kvalita vnitřního vzduchu při hybridním větrání* (pdf. verze)
2. SVOBODOVÁ, J: *Fyzikálně chemické faktory školní prostředí*. (pdf. verze)  
<http://svp.muni.cz/ukazat.php?docId=48> [cit. 2010 – 10 – 04]
3. *Carbon Dioxide as a Fire Suppressant: Examining the risks*. EPA, US, 2000. Appendix B
4. SILBERNAGL, S., DESPOPOULOS, A.: *Atlas fyziologie člověka*, 6. vyd. Praha: Grada, 2004, str. 128 – 132.



## Oxid uhličitý a zdraví člověka

*"Člověk je člověku ustavičným nebezpečím."*

*Lucius Annaeus Seneca*

Oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) u člověka dramaticky ovlivňuje funkci hlavních vitálních procesů, včetně kontroly dechu, rozšíření/stažení cév (zejména mozkové tkáně) a pH tělesných tekutin. CO<sub>2</sub> je v krvi fyzikálně rozpuštěný nebo chemicky vázaný na hemoglobin. Primárně je přítomný v plazmě jako ion bikarbonátu. Při zvýšené hladině CO<sub>2</sub> v krvi dochází ke zrychlení a prohloubení dechu a snížení pH krve. Zvýšená koncentrace CO<sub>2</sub> v ovzduší nad určitou hranici nepříznivě ovlivňuje zdraví člověka, zejména dýchání. Přitom špatná kvalita vzduchu hrozí zejména u nových budov, které byly opatřeny, za účelem snížení teplených ztrát, dobře těsními okny, která však mají nedostatečnou infiltraci a oproti starším oknům nezajišťují dostatečnou výměnu vzduchu. Při hodnotách nad 5000 ppm má CO<sub>2</sub> na člověka toxické účinky. Jestliže dochází k vystavení koncentraci nad 30 000 ppm po dobu jedné hodiny, většina lidí trpí bolestmi hlavy, závratěmi a nevolností. K letargii a ztrátě vědomí dochází při 70 000 – 100 000 ppm. Smrtelná je koncentrace nad 170 000 ppm, kdy stačí expozice po dobu pouhé minuty. Zajímá vás, za jak dlouho se zvýší koncentrace CO<sub>2</sub> na nebezpečnou úroveň? Víte jaká je běžná koncentrace CO<sub>2</sub> ve venkovním prostředí a jaká v místnosti? Jaká je zákonem stanovená kvalita vzduchu? Nebo kolik litrů CO<sub>2</sub> průměrně člověk vydýchá za hodinu? Jak intenzivně je třeba větrat, abychom kvalitu vzduchu udrželi na požadované úrovni?

### Hodnoty použité v modelu

Běžná koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti je 600 – 900 ppm, zatímco ve venkovním prostředí se pohybuje okolo 330 – 370 ppm. Přitom průměrná hodnota CO<sub>2</sub> se v průběhu 24 hodin předpisuje na 1000 ppm. Zároveň by v průběhu 24 hodin nikdy neměla být překročena hodnota 1200 ppm, což je hodnota stanovená zákonem. Protože lidé stále produkují CO<sub>2</sub> dýcháním, je pro udržení kvality vzduchu interiéru potřeba pravidelně větrat. Člověk vydýchá průměrně 19 litrů CO<sub>2</sub> za hodinu. Hlavní příčinou zvyšování koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti je tedy, vedle dýchacích procesů, nedostatečné větrání a velikost prostoru. Klasická třída má objem vzduchu cca 160 -180m<sup>3</sup> a běžná obytná místnost přibližně 52 m<sup>3</sup> vzduchu.

## 1. Úloha: Struktura modelu

Projděte si svým tempem strukturu modelu (klikněte na tlačítko *Jak je to*), tak abyste pochopili, jak je model vybudován. Poznamenejte si slovně do tabulky níže, jak jsou definovány vztahy jednotlivých procesů nebo proměnných.

### 1.1. Zapsání vztahů

Proces/proměnná	Vztah	Jednotky
Dýchání	Počet osob · produktivita dýchání	l/h
Koncentrace vydýchaného CO <sub>2</sub> v místnosti	Objem vydýchaného vzduchu/ Objem vzduchu v místnosti	l/m <sup>3</sup>
Vzrůst koncentrace CO <sub>2</sub>	(Počáteční koncentrace CO <sub>2</sub> v místnosti + Koncentrace vydýchaného CO <sub>2</sub> v místnosti) · Frakce	l/ (m <sup>3</sup> ·h)
Intenzita větrání	Dýchání / ( Koncentrace CO <sub>2</sub> , kterou chceme v místnosti udržet - Venkovní koncentrace CO <sub>2</sub> )	m <sup>3</sup> /h

### 1.2. Matematický popis vztahů

#### 1.2.1 Odvození obecného vzorce: Zvyšování koncentrace CO<sub>2</sub> v závislosti na dýchacích procesech a velikosti místnosti.

A) Doplňte tabulku, ve které si označíme veličiny pro snazší manipulaci s nimi v další práci.

Označení	Veličina	Jednotky
P	produktivita dýchání	l/h
t	čas	h
V <sub>vzduch</sub>	objem vzduchu v místnosti	m <sup>3</sup>
V <sub>vyd(t)</sub>	objem vydýchaného CO <sub>2</sub> v čase t	l
C <sub>vyd(t)</sub>	koncentrace vydýchaného CO <sub>2</sub> v místnosti v čase t	l/ m <sup>3</sup>
C <sub>CO2(t<sub>0</sub>)</sub>	počáteční koncentrace CO <sub>2</sub> v místnosti	l/ m <sup>3</sup>
C <sub>CO2(t )</sub>	koncentrace CO <sub>2</sub> v místnosti v čase t	l/ m <sup>3</sup>

B) Nyní přepište vztahy z úlohy 1.1. do jazyka matematiky pomocí označení, která jsou v tabulce 1.2.1.A a zkontrolujte konzistenci jednotek.

Objem vydýchaného CO<sub>2</sub> v čase t

$$V_{\text{vyd}}(t) = P \cdot t$$

### Koncentrace vydýchané CO<sub>2</sub> v místnosti v čase t

$$C_{\text{vyd}}(t) = V_{\text{vyd}}(t) / V_{\text{vzduch}}$$

### Nárůst koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti

$$C_{\text{CO}_2}(t) = C_{\text{CO}_2}(t_0) + C_{\text{vyd}}(t)$$

**C) Dosazením do posledního vztahu napište obecný vzorec pro výpočet koncentrace oxidu uhličitého v čase t.**

$$C_{\text{CO}_2}(t) = C_{\text{CO}_2}(t_0) + P \cdot t / V_{\text{vzduch}}$$

### **1.2.2 Odvození obecného vzorce: Objem venkovního vzduchu potřebného k udržení kvalitu vzduchu interiéru na požadované kvalitě**

Člověk v klidu až při střední práci vydýchá 19 - 45 (l/h) CO<sub>2</sub>. Maximální povolená koncentrace oxidu uhličitého v interiéru je 1.2 l/m<sup>3</sup> (1200 ppm). Běžná koncentrace oxidu uhličitého ve venkovním přiváděném vzduchu je 0.39 l/m<sup>3</sup> (390 ppm). Ptáme se, jaký objem venkovního vzduchu potřebujeme, abychom udrželi koncentraci oxidu uhličitého na 1200 ppm. Uvažujeme  $x$  jako neznámý objem přiváděného vzduchu. Chceme-li udržet koncentraci interiéru na 1200 ppm, musí být objem přiváděné CO<sub>2</sub> z venkovního prostředí stejný jako objem CO<sub>2</sub> jdoucího ven. Přitom od objemu CO<sub>2</sub> jdoucího ven musíme odečíst objem vydýchaného CO<sub>2</sub>, neboť chceme koncentraci udržet na 1200 ppm.

**A) Doplňte tabulku, ve které si označíme veličiny pro snazší manipulaci s nimi v další práci.**

Označení	Veličina	Jednotky
$x$	neznámý objem přiváděného vzduchu za čas $t$	m <sup>3</sup> /h
$V_{\text{CO}_2}$	objem škodlivin (CO <sub>2</sub> ) vydýchaného za čas $t$	l/h
$V_{\text{ven}}$	objem škodlivin (CO <sub>2</sub> ) jdoucí ven	l/h
$V_{\text{dovnitř}}$	objem škodlivin (CO <sub>2</sub> ) jdoucí dovnitř	l/h
$c_{\text{max}}$	maximální povolená koncentrace CO <sub>2</sub> v interiéru	l/m <sup>3</sup>
$c$	koncentrace CO <sub>2</sub> ve venkovním přiváděném vzduchu	l/m <sup>3</sup>

### **B) Vyjádřete následující vztahy v jazyce matematiky**

Objem škodlivin jdoucích ven:  $V_{\text{ven}} = c_{\text{max}} \cdot x$

Objem škodlivin jdoucích dovnitř:  $V_{\text{dovnitř}} = c \cdot x + V_{\text{CO}_2}$

Vztah mezi objemem škodlivin jdoucím ven a dovnitř

$$V_{\text{ven}} = V_{\text{dovnitř}} \quad \text{neboli} \quad c_{\text{max}} \cdot x = c \cdot x + V_{\text{CO}_2}$$

### C) Vyjádříme neznámou x

$$x[m^3/h] = \frac{V_{CO_2} [l/h]}{(c_{max} - c)[l/m^3]} \cdot 10^3$$

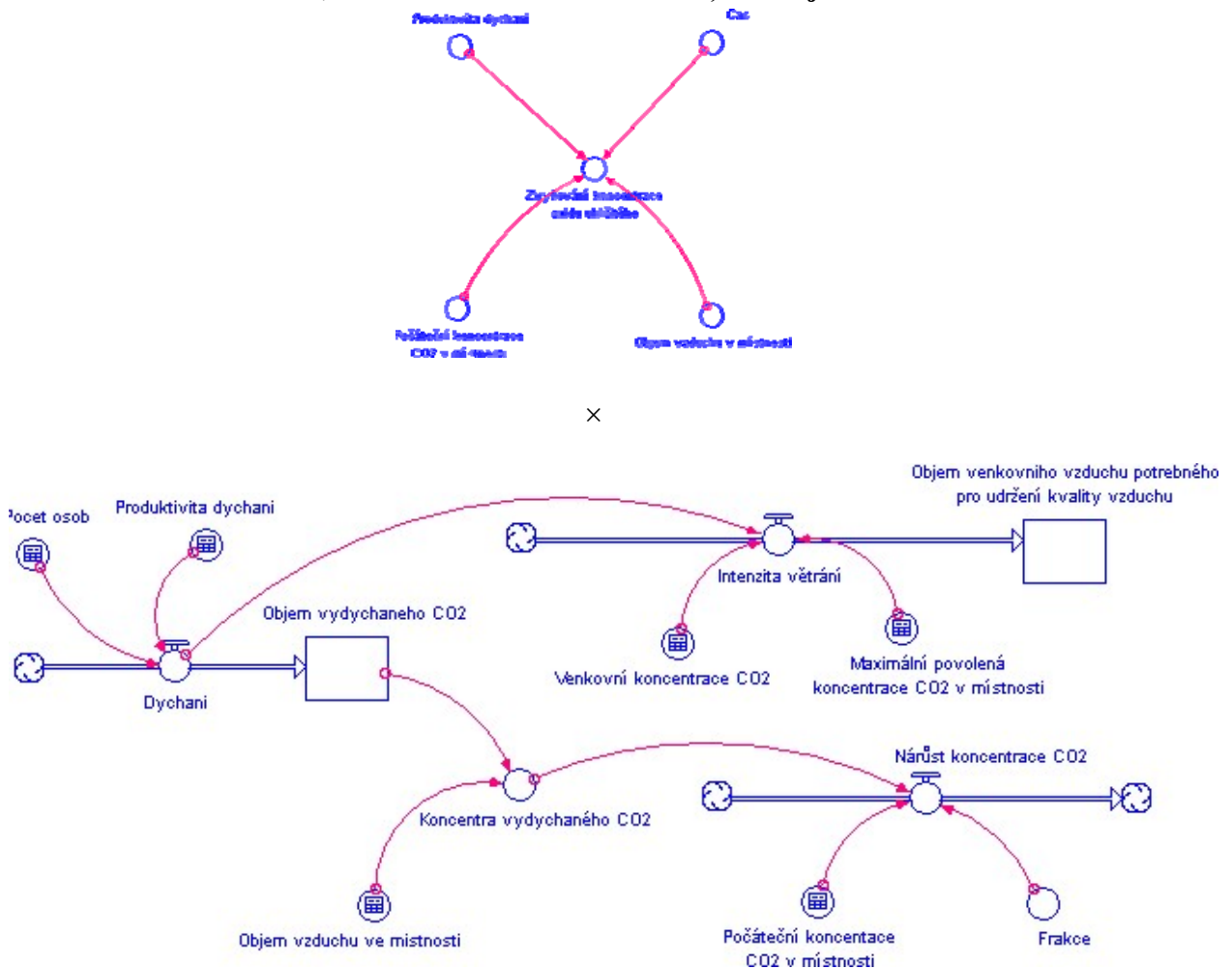
### 1.3. Závěr

#### 1.3.1 Jaké má obecný vzorec výhody a nevýhody?

Výhody – Obecný vzorec umožní provést výpočet ihned, tzn. místo tří výpočtů (kroků) provedu pouze jediný.

Nevýhody - Výsledný vzorec je „mrtvý“, pokud neznáme, jak vznikl. Stella pomáhá vyhnout se matematickému formalismu, kdy je na jedné straně studovaný jev a na druhé straně rovnice.

#### 1.3.2 Jak by se dal proces zvyšování oxidu uhličitého v místnosti modelovat na základě znalosti obecného vzorce z úlohy 1.2.A? V čem se obě pojetí modelu (1. založené na obecné rovnici, 2. založené na více rovnicích) odlišují s ohledem na strukturu?



Model založený na odvozeném obecném vzorci je klasický „mrtvý buvol“. Problémem takového pojetí modelu je, že je často velmi abstraktní a i když generuje stejné nebo obdobné výstupy jako reálný systém, jejich struktura struktuře reálného systému neodpovídá. Proto jsou pro uživatele tyto modely obvykle špatně srozumitelné a aplikovatelné. Stella se tak snaží se ukázat, že matematika není jen produkt, ale také proces.

## 2. Úloha: Simulace – změna parametrů a získávání informací z tabulky

Výpočtem nebo simulací získajte informace a odpovězte na následující otázky. Mějme místnost o rozměrech  $(4 \times 5 \times 2,6)(m)$  a počáteční koncentrací 600 ppm.

### 2.1. O kolik se zvýší ppm v místnosti za jednu, dvě, tři... hodiny, je-li obsazena pouze jedním člověkem?

*Uvažujme místnost o rozměrech  $(4 \times 5 \times 2,6)(m)$ . Tato místnost má tedy objem  $52 m^3$  vzduchu. Dále předpokládáme počáteční koncentraci oxidu uhličitého 600 ppm, což znamená, že v  $1 m^3$  je 600 ml oxidu uhličitého. V celé místnosti je pak  $600 \cdot 52 = 31\,200 ml = 31,2 l (CO_2)$ . Zvýší-li se objem o 19 l bude v místnosti 50,2 l oxidu uhličitého. Pokud objem  $CO_2$  podělíme objemem vzduchu, dostaneme koncentraci  $CO_2$ , tj.  $50,2 / 52 = 0,965 l/m^3$ , což je 965 ppm. Podobně za dvě hodiny se vydýchá již 38 l oxidu uhličitého a ppm se zvýší na 1331 ppm. Využijeme odvozený obecný vzorec, dostaneme výsledek ihned.*

(965.5 ppm, 1331 ppm, 1696 ppm)

### 2.2. Za jak dlouho by se koncentrace oxidu uhličitého zvýšila nad maximální zákonem stanovenou hodnotu, pokud by se nevětralo a okna by byla dobře izolovaná?

*Z výpočtů výše je patrné, že již po dvou hodinách by se v nevětrané místnosti s dobře izolovanými okny zvýšila koncentrace oxidu uhličitého nad zákonem stanovenou hodnotu.*

(cca 2 hodiny)

### 2.3. Za jak dlouho se zvýší koncentrace oxidu uhličitého v dané místnosti na hodnotu, jež způsobí během minuty bezvědomí a smrt?

*Víme, že jeden člověk vyprodukuje za hodinu 19 litrů oxidu uhličitého. Za čas  $t$  se tedy vyprodukuje  $19 \cdot t$  litrů  $CO_2$ . Chceme vědět, za jak dlouho dosáhne koncentrace v místnosti 170 000 ppm. Přitom při 600 ppm v dané místnosti je 31,2 litrů oxidu uhličitého. Při 170 000 ppm je v místnosti 8840 litrů. Proto*

$$t[h] = \frac{8840 - 31,2}{19} = 463$$

*To je 463 hodin, což je 19 dnů a tedy 2,75 týdnů.*

(2,75 týdnů)

### 2.4. Kolik osob by muselo být v místnosti, aby se vyčerpал čerstvý vzduch (tj. aby hodnota $CO_2$ dosáhla 170 000 ppm) již během jednoho dne?

*Jedna osoba vydýchá za den  $24 \cdot 19 = 456$  litrů oxidu uhličitého. Potřebujeme spočítat, kolik osob vydýchá  $8840 - 32,1 = 8808,8$  litrů. To je  $8808,8 / 456$  což je přibližně 19 osob.*

(19 osob)

### 2.5. Kolik $m^3/h$ venkovního vzduchu potřebujete, abyste udrželi kvalitu vzduchu v místnosti na 1000 ppm, je-li v místnosti pouze jedna osoba?

(29, 23  $m^3/h$ )

### 3. Úloha: Simulace – změna parametrů a získávání informací z grafu

- 3.1. **Rozhodněte, zda poroste koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti rychleji v malé nebo velké místnosti. Svou hypotézu zdůvodněte a dokažte na grafu.**

*Koncentrace CO<sub>2</sub> v poroste ve velké místnosti pomaleji, protože objem vydýchaného CO<sub>2</sub> je stále stejný, ale rozptýlí se ve větším objemu vzduchu. Z grafu je patrné, že gradient grafu je strmější pro menší místnosti, proto je rychlost růstu koncentrace rychlejší při menších rozměrech místnosti.*

- 3.2. **Jakým způsobem ovlivní počáteční koncentrace CO<sub>2</sub> rychlost růstu koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti? Svou hypotézu zdůvodněte a dokažte na grafu.**

*Počáteční koncentrace v místnosti nijak celkovou rychlost růstu neovlivní. Víme, že lineární funkce má předpis  $y = c + kt$ , kde  $k$  je gradient a  $c$  je úsek na ose  $y$ . Počáteční koncentrace je právě úsek  $c$ , gradient  $k$  se nemění a tedy ani rychlost růstu koncentrace se nemění.*

- 3.3. **Jak se změní objem přiváděného venkovního vzduchu potřebného pro udržení kvality vzduchu interiéru, pokud se kvalita venkovního vzduchu zhorší na 390 ppm? Svou hypotézu zdůvodněte a ověřte na grafu.**

*Objem přiváděného venkovního vzduchu se zvýší, protože se zhoršenou kvalitou vzduchu je do místnosti přiváděn větší objem CO<sub>2</sub>. Skutečnost je opět patrná z gradientů grafů pro 360 a 390 ppm.*

- 3.4. **Jak se změní objem potřebného venkovního vzduchu nutný po udržení kvality vzduchu interiéru, pokud zpřísníme normy a budeme požadovat maximální povolenou koncentraci CO<sub>2</sub> v místnosti 1000 ppm. Svou hypotézu zdůvodněte a ověřte na grafu.**

*Objem přiváděného venkovního vzduchu se opět zvýší, protože vyžadujeme kvalitnější vzduch (méně oxidu uhličitého), ale z venku přichází stále stejné množství škodlivin a stále stejné množství škodlivin je produkováno dýcháním.*

### **9.2.3. Metodický manuál 03 – Cesta do hlubin**

#### **Metody a pomůcky**

##### **Cíl**

- Odrazový můstek pro další práci na téma fotosyntéza (1): zopakování a utřídění stávajících vědomostí o stavbě a funkci listu, buňky a chloroplastu.

##### **Výstupy**

- Student popíše řez listem, stavbu buňky a chloroplastu. Vyjmenuje základní funkci pletiv listu, organel v buňce a strukturních částí chloroplastu.

##### **Metody**

Hra se slovy a jejich vzájemná kombinace, diskuse, křížovka a práce s textem.

##### **Pomůcky**

Časopis Vesmír nebo zkopírované upravené texty na zvláštním papírku.

**Námět:** Skutečný list begonie (salátu) – pozorování pod lupou (lze sloupnout pokožku a podívat se, že není zelená).

##### **Literatura**

JAROMÍR KUTÍK: *Tylakoidní membrána, sídlo fotosyntézy*. Vesmír 75, 33, 1996/1

(<http://www.vesmir.cz/clanek/tylakoidni-membrana-sidlo-fotosyntezy>)

## **Teorie ve zkratce**

### **Stavba listu a funkce jeho složek**

*Kutikula* (z lat. tenká pokožka) – Nepropustná vosková vrstva pokrývající pokožku, jež zabraňuje ztrátám vody a redukuje průnik patogenů. Kutikula mnoha rostlinných druhů je vodě odolná. Kutikula též zeslabuje intenzitu fotosynteticky aktivního a UV záření (voskové krystalky zvětšují rozptyl a odraz FAR na úroveň, která je přijatelná; kutikula spolu s buněčnou stěnou a speciálními látkami (např. flavonoidy) ve vakuolách epidermálních buněk může efektivně přispět k zeslabení UV záření, a tak ochránit citlivé vnitřní tkáně).

*Svrchní epidermis* – Poskytuje ochranu listu a zpravidla bývá pokryta kutikulou. Tvar epidermálních buněk ovlivňuje množství vstupujícího světla do listu (vypouklý tvar funguje jako čočka - spojka, která zvyšuje množství energie vstupující do listu). Většina epidermálních buněk není zelená (neobsahuje chloroplasty), jediné pokožkové buňky, které chloroplasty obsahují jsou svěrací buňky průduchů. Epidermis může nést další struktury, zejména trichomy (chlupy) různého tvaru.

*Mezofyl* – Pletivo mezi svrchní a spodní pokožkou, která může být rozlišeno na palisádový a houbový parenchym. Chloroplasty mezofylových buněk se nacházejí v tenké vrstvě cytoplasmy, přitisknuté ke stěně buňky turgorem vakuoly. Toto uspořádání zajišťuje krátkou cestu pro CO<sub>2</sub> od povrchu buňky k fotosyntetickým centrům na vnitřních membránách chloroplastů.

*Palisádový parenchym* – Tvořen protáhlými buňkami, které obsahují mnoho malých chloroplastů. Architektura palisádového parenchymu usnadňuje proniknutí světla skrze úzké mezibuněčné prostory tvořící kanálky mezi jednotlivými buňkami do nižších vrstev listu a jeho více uniformní distribuci záření. Organizace tohoto pletiva je ovlivněna intenzitou záření (při vysoké ozářenosti se vyvíjejí dlouhé palisádové buňky i v několika vrstvách, zatímco při zastínění je palisádový parenchym vytvořen jen slabě nebo vůbec).

*Houbový parenchym* – Tvořen nepravidelně tvarovanými buňkami, mezi kterými jsou často velké mezibuněčné prostory, které umožňují snadný vstup a transport oxidu uhličitého i odchod kyslíku a vodní páry. Buňky houbového parenchymu jsou svým tvarem více adaptovány na využití sníženého množství světla, neboť nepravidelný povrch zvyšuje pravděpodobnost, že se odražené světlo dostane do fotosyntetického centra.

*Spodní epidermis* – Vrstva buněk, která u většiny dvouděložných rostlin obsahuje průduchy. U rostlin vodních se splývavými listy bývají průduchy naopak ve svrchní pokožce. U trav mohou být průduchy v obou pokožkách – svrchní i spodní.

*Průduchy* – Otevírání pórů je regulováno svěracími buňkami, které jsou ovlivňovány signály z okolí i změnami uvnitř rostliny. Pohyb průduchů je ovlivňován hlavně parciálním tlakem oxidu uhličitého v mezibuněčných prostorách (otevírání průduchů na světle je způsobeno hlavně spotřebou oxidu uhličitého) a dostupností vody (při jejím nedostatku se průduchy zavírají). Otevíráním/zavíráním průduchů rostlina tedy reguluje příjem oxidu uhličitého a vydává vody. Z hlediska napadání rostlin různými patogeny jsou průduchy též „slabým místem“, kudy mohou donitř listu pronikat např. houby.

### **Stavba buňky a funkce jejích organel**

*Buněčná stěna* – Složitá struktura utvářená především z polysacharidů. Významnou součástí jsou zejména svazky vláknitých molekul celulózy, hemicelulózy a pektiny). Obsahuje též bílkoviny a látky fenolické povahy (lignin). Funguje jako vnější „kostra“ udávající tvar. Podílí



se na regulaci růstu a diferenciaci buňky. Poskytuje obranu před patogeny a hraje zásadní roli v osmotických procesech v rostlinné buňce.

*Cytoplasmatická membrána* – tvořená fosfolipidovou dvojvrstvou představuje ozhraní mezi cytoplasmou a „vnějším prostorem“, včetně prostoru buněčné stěny. Obsahuje kanály, přenašeče a receptory, které umožňují výměnu látek a signálů s okolím.

*Cytoplasma* – Obsahuje velké množství velkých i malých molekul, chává se více jako vodný gel než jako roztok. Je vysoce strukturovaná, zejména díky systému cytoskeletu (složeného z několika typů bílkovinných vláken – mikrotubulů a aktinových filament). Hlavní složkou cytoplazmy jsou bílkoviny (40 – 50% její sušiny). Další nezbytnou složkou cytoplazmy rostlinných buněk je voda (70 – 80% celkové hmotnosti až na semena, u kterých činí 14%), která tvoří hydratační obal bílkovinných molekul a pomáhá tak udržet jejich strukturu. Dále jsou to ionty a nízkomolekulární metabolity. Cytoplasma je místem mnoha enzymově katalyzovaných reakcí (např. biosyntéza mastných kyselin, glykolýza, pentózový cyklus, syntéza barviv rozpustných ve vodě) i místem programované syntézy bílkovin na ribosomech.

*Ribosomy* – Supramolekulární útvary složené z rRNA a řady proteinů katalyzujících přepis informace z posloupnosti bází v nukleových kyselinách do posloupnosti aminokyselin v polypeptidech. Jsou sloužené ze dvou podjednotek: *malá podjednotka* zodpovídá za nasednutí tRNA na kodony mRNA a *velká podjednotka* katalyzuje vznik peptidové vazby mezi aminokyselinou a polypeptidovým řetězcem.

*Plasmodesmy* – cytoplasmatické kanály propojující sousední buňky zajišťují transport a komunikaci mezi sousedními buňkami.

*Endoplasmatické retikulum (ER)* – Soustava vzájemně propojených membránových váček a trubiček uvnitř cytoplazmy, která se často rozpiná téměř po celé buňce. ER je hlavním místem syntézy nových membrán buňky, dále syntézy lipidů a bílkovin. Na povrchu některých oblastí ER jsou uchyceny ribosomy, které syntetizují bílkoviny pro „export“ do membrány či přes membránu (např. do stěny nebo do vakuoly). Také slouží jako intracelulární zásobárna  $Ca^{2+}$ . Může procházet skrz plasmodesmy z buňky do buňky.

*Golgiho aparát* – Tvořen soubory zploštělých membránových váček zvaných cisterny, které jsou na sobě naskládány jako talíře. V rostlinné buňce je často v desítkách kopií. Přijímá proteiny a lipidy z ER, chemicky je upravuje a potom je rozesílá do různých míst určení. GA dále syntetizuje polysacharidy.

*Vakuola* – Slouží jako zásobárna vody, AK, organických kyselin, anorganických iontů a barviv, je místem syntézy sacharidů (fruktanů), zajišťuje turgor a homeostázu cytoplazmy (jestliže dojde k poklesu pH v okolí buňky, dojde též k poklesu pH buněčné šťávy v důsledku transportu iontů mezi vakuolou a cytoplasmou). Obsahuje též hydrolytické enzymy, které umožňují programovanou buněčnou smrt nebo mobilizaci rezerv v semenech. Komunikuje s dalšími endomembránovými strukturami (GA, ER) prostřednictvím membránových váček.

*Jádro* – Ohraničeno dvouvrstevnou jadernou membránou propojenou s vnitřním prostorem ER. Na jadernou membránu navazují dvě sítě proteinových vláken – zevnitř *jaderná lamina*, která vytváří tenkou podpůrnou síť z vnitřní strany jaderné membrány; z vnější strany cytoskelet. Propustnost jaderné membrány je zajištěna *jadernými póry*, jimiž jsou aktivně přenášeny vybrané molekuly z a do cytoplazmy (mRNA transportována do cytoplazmy, jaderné proteiny jsou importovány do jádra). Jádro obsahuje *jadérko* (nukleolus) a *chromatin* složený z dvojšoubovicové DNA (= deoxyribonukleové kyseliny – nositelky dědičné informace) a řady bílkovin, s jejich pomocí jsou dlouhé molekuly DNA precizně svinuty a

složeny. V průběhu přípravy buněčného dělení (mitózy) se chromati skládá ještě kompaktněji, takže ve světelném mikroskopu lze vidět jednotlivé *chromozomy*.

*Jadérko* – Nachází se uvnitř jádra. Zde transkribovány geny pro rRNA a jsou zde také z proteinů importovaných z cytoplasmy sestavovány ribosomální podjednotky.

*Mitochondrie* – Uzavřena dvěma oddělenými membránami, které obsahují specifické bílkoviny umožňující řízený průchod některých molekul. Vnitřní je zprohýbaná v krysty, a její záhyby směřují do vnitřku mitochondrie. Mitochondrie jsou semiautonomní orgány – obsahují svou vlastní DNA a rozmnožují se dělením. Všeobecně se předpokládá, že vznikly z bakterií (z purpurových bezsírých bakterií), které byly pohlceny předkem eukaryontní buňky. Mitochondrie jsou generátory chemické energie pro buňku. Získávají energii oxidací molekul cukrů, mastných kyselin a dalších látek a produkují základní zdroj energie pro buňku (chemické palivo) *adenosintrifosfát* (ATP). Při své činnosti uvolňují oxid uhličitý.

*Chloroplasty* – Fotosyntetické orgány, které mají na povrchu dvě obalové membrány, kde vnitřní tvoří systém propojených plochých membránových váčků – tylakoidů. Tylakoidy mohou být navršeny ve „stohy“ – uspořádané shluky membrány uvnitř orgány zvané *grana*, které obsahují zelené barvivo chlorofyl. Rostliny získávají svou energii přímo ze slunečního světla, což jim umožňují právě chloroplasty, které zachycují energii slunečního záření v molekulách chlorofylu a využívají ji k výrobě energeticky bohatých sacharidů. Při tomto procesu se uvolňuje kyslík jako vedlejší produkt. Chloroplasty jsou semiautonomní orgány podobně jako mitochondrie. Předpokládá se, že se vyvinuly z bakterií příbuzných sinicím. Ve stromatu chloroplastu probíhá Calvinův cyklus a syntéza asimilačního škrobu, mastných kyselin a fotosyntetických pigmentů. Ve stromatu se též nachází vlastní DNA chloroplastů a probíhá zde transkripce a translace.

### **Stavba chloroplastů**

*Vnější membrána* (lipidová dvojvrstva) – Odděluje vnější a vnitřní prostředí

*Vnitřní membrána* – Vchlipuje se dovnitř a odškrucuje tylakoidy.

*Tylakoidy* – Membránové struktury tvaru plochého váčku, které obsahují chlorofyl,  $\beta$ -karoten, jež umožňují absorpci světla. Zde probíhá světelná fáze fotosyntézy.

*Grana* – Shluky tylakoidů.

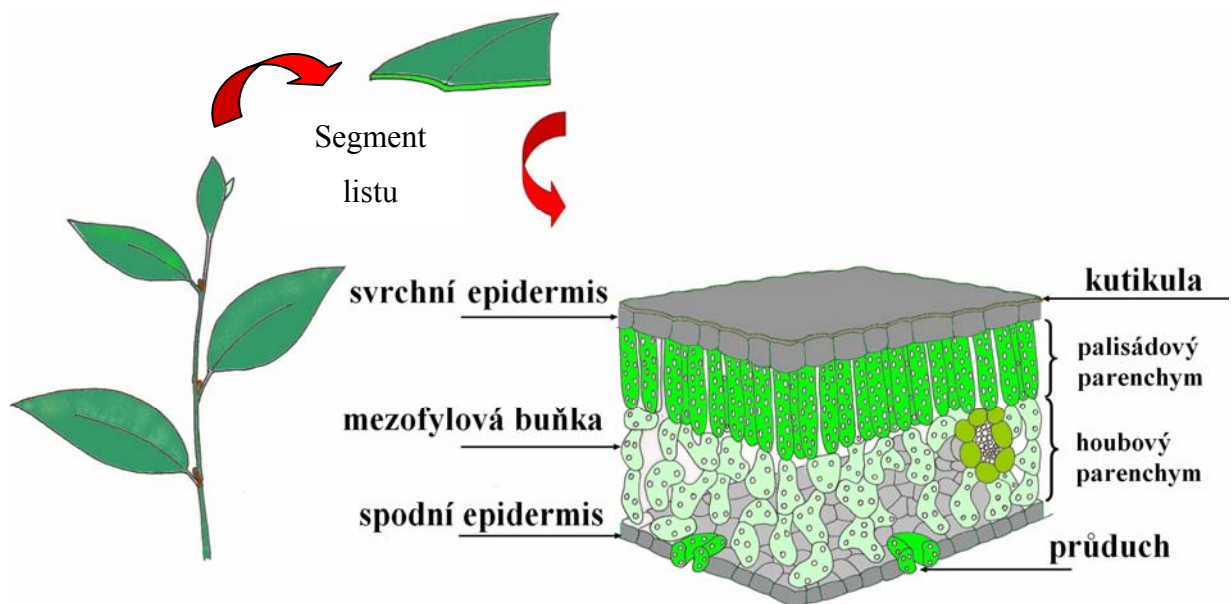
*Stroma* – Je místem fixace oxidu uhličitého (v procesu zvaném Calvinův cyklus) - syntézy škrobu. Zde probíhá také temnostní fáze fotosyntézy, syntéza chloroplastových bílkovin a nukleových kyselin.

*V této části si zopakujeme nebo doplníme vědomosti o stavbě a funkci listu, buňky a chloroplastu, abychom si uvědomili, který rostlinný orgán zodpovídá za fotosyntézu a kde přesně fotosyntéza probíhá. Budeme se tak dostávat stále hlouběji do struktury rostliny. Nejprve se podívejme na rostlinu jako celek.*

## Stavba listu – funkce jednotlivých částí

- 1) Pokud bychom udělali příčný řez listem a prohlédli si ho pod mikroskopem, objevili bychom vnitřní struktury, které jsou zobrazené na obrázku (platí pro dvouděložné rostliny rostoucí na souši). Přírozeně nás začne zajímat, k čemu jednotlivé struktury slouží.

- a) Nejprve tyto struktury pojmenujte.



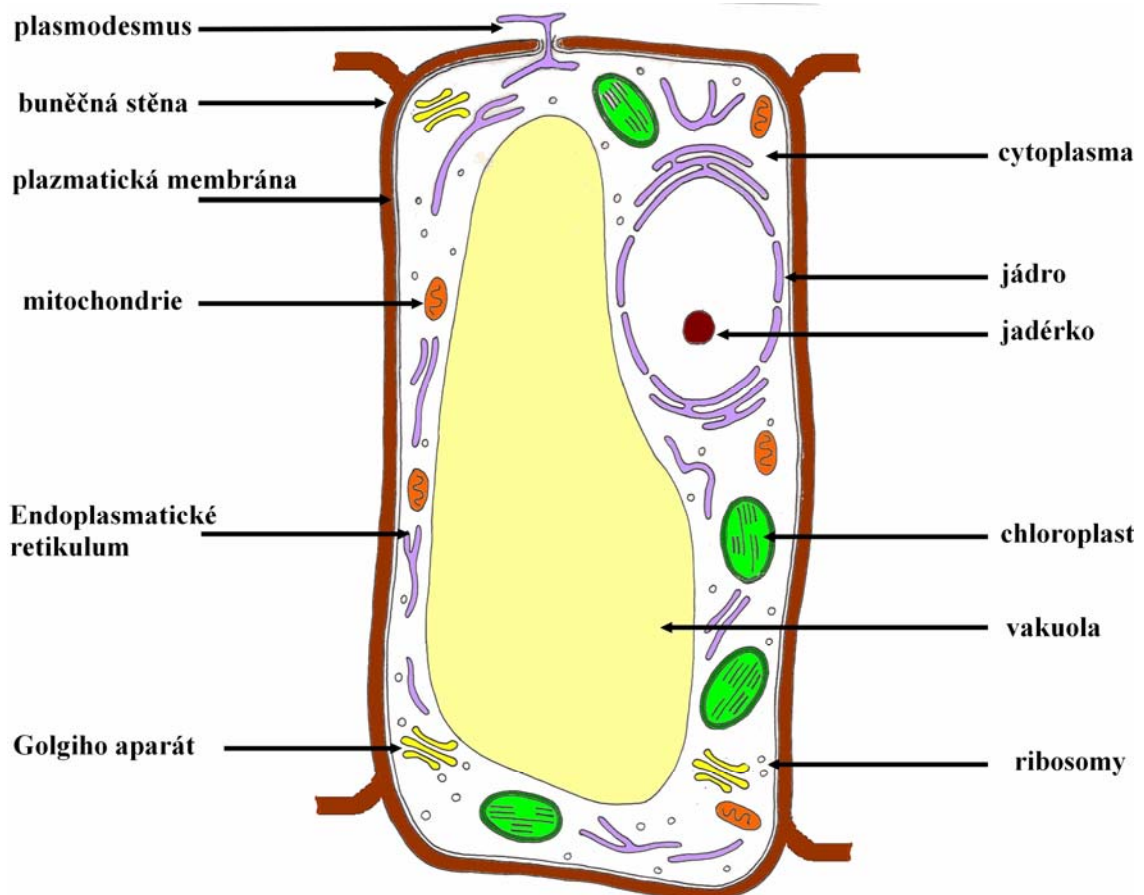
- b) Doplněte následující text pojednávající o funkci jednotlivých částí listu.

Svrchní pokožka (epidermis) poskytuje **ochranu** listu a může být kryta kutikulou, která zabraňuje ztrátám **vody** a snižuje průnik patogenů. Pod svrchní pokožkou se nachází palisádový parenchym, který se skládá z podlouhlých buněk orientovaných kolmo k pokožce listu. Architektura těchto buněk usnadňuje proniknutí **světla** do nižších vrstev listu a probíhá zde **fotosyntéza**. Houbový parenchym pod parenchymem palisádovým je tvořen buňkami nepravidelného tvaru, které jsou též místem **primární fixace** oxidu uhličitého. Spodní pokožka obsahuje průduchy, které zajišťují **výměnu plynů a látek** mezi vnitřním a vnějším prostředím. Otevíráním a zavíráním průduchů rostlina reguluje příjem **oxidu uhličitého** a výdej **vody** ve formě **vodní páry**.

## Stavba rostlinné buňky – funkce jednotlivých organel

2) Nyní vidíme, že se naše pozornost musí obrátit více do nitra rostlinné buňky, abychom nahlédli, co se děje uvnitř.

a) Nejprve si prohlédněte obecnou rostlinnou buňku na obrázku, popište její části.



**b) Přiřad'te k jednotlivým číslům klíčové pojmy označené velkými a malými písmeny. Svůj výběr odůvodněte.**

1. Buněčná stěna	A) DNA	a) Brnění
2. Cytoplasma	B) Energie	b) Dělení
3. Endoplasmatické retikulu	C) Enzymy	c) Olej
4. Chloroplast	D) Lipidy	d) Maso
5. Jádro	E) Oxid uhličitý	e) Reakce
6. Mitochondrie	F) Pevnost	f) Redbull
7. Plasmatická membrána	G) Proteiny	g) Telefon
8. Ribosomy	H) Signály	h) Továrna
9. Vakuola	I) Zásobárna	i) Voda
		j) Kosti

### **Odůvodnění:**

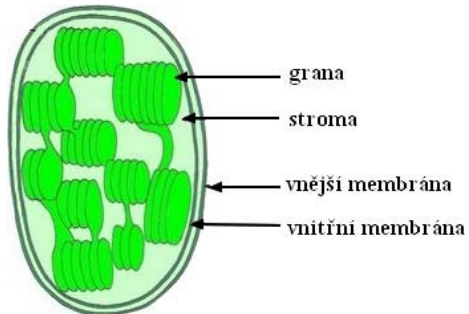
Kombinací může být více. Důležité je, jak student spojení slov obhájí. Např.

1. Buněčná stěna + pevnost + brnění: buněčná stěna slouží jako vnější „kostra“ udávající tvar.
2. Cytoplasma + enzymy + reakce: cytoplasma je místem mnoha enzymově katalyzovaných reakcí.
3. Endoplasmatické retikulum + lipidy + olej: v ER probíhá syntéza lipidů, olej je tvořen tuky. Nebo Endoplasmatické retikulum + kosti + zásobárna:  $Ca^{2+}$  jsou v kostech. ER je zásobárnou  $Ca^{2+}$ .
4. Chloroplast + oxid uhličitý + továrna: ve stromatu chloroplastů dochází k fixaci oxidu uhličitého, továrna produkuje oxid uhličitý.
5. Jádro + DNA + dělení: Jádro obsahuje genetickou informaci, která se při dělení předává dceřiným buňkám.
6. Mitochondrie + energie + továrna: mitochondrie vytvářejí chemickou energii, továrna také vyrábí určitý druh energii. Nebo Mitochondrie + energie + redbull: mitochondrie vytvářejí chemickou energii, redbull je energetický nápoj.
7. Plasmatická membrána + signály + telefon: plasmatická membrána přijímá signály z okolí, telefon přenáší signály.
8. Ribosomy + proteiny + maso: na ribosomech probíhá syntéza proteinů, maso obsahuje proteiny.
9. Vakuola + zásobárna + voda: vakuola je zásobárnou vody, AK a barviv, podílí se na osmotických jevech v buňce, které závisí mimo jiné na transportu vody z / do vakuoly.

### Stavba chloroplastu – funkce jednotlivých kompartmentů

3) Ujasnili jsme si, ve které organelle fotosyntéza probíhá a můžeme se podívat hlouběji do její struktury. Pomocí upraveného výňatku z článku v časopisu Vesmír zodpovězte následující otázky.

a) Z jakých strukturních částí se chloroplast skládá? Popište obrázek níže.



**b) Označení *tylakoid* pochází z řečtiny a označuje: „...“ (viz tajenka křížovky).**

1. Molekuly, které tvoří hlavní složku biologických membrán.
2. Kompartment chloroplastu, ve kterém probíhá fixace oxidu uhličitého.
3. Specializovaná fotosyntetická membrána tvořící váčkovitou strukturu.
4. Zelené barvivo rostlin.
5. Struktura, kterou mají jak mitochondrie, tak chloroplasty a vakuoly.
6. Shluky tylakoidů.
7. Vzhled tylakoidu.
8. Proces, kterým vznikají tylakoidní membrány z vnitřní membrány plastidů
9. Nezelená fotosyntetická barviva u řas (ne karotenoidy).
10. Fotosyntetické organely.
11. Zelené fotosyntetické organely.
12. Název fáze fotosyntézy, která je vázána na fotosyntetickou membránu a je závislá na světle.

1	F	O	S	F	O	L	I	P	I	D	Y					
2					S	T	R	O	M	A						
3	T	Y	L	A	K	O	I	D								
4				CH	L	O	R	O	F	Y	L					
5					M	E	M	B	R	Á	N	A				
6					G	R	A	N	A							
7				P	L	O	CH	Y		V	Á	Č	E	K		
8				V	CH	L	I	P	O	V	Á	N	Í			
9							F	Y	K	O	B	I	L	I	N	Y
10				P	L	A	S	T	I	D	Y					
11						CH	L	O	R	O	P	L	A	S	T	Y
12							P	R	I	M	Á	R	N	Í		

## 9.2.4. Metodický manuál 04 – Oxid uhličitý a ozáření

### Metody a pomůcky

#### Cíl

- Ukázat vliv oxidu uhličitého a ozáření na rostliny, zejména na rychlost fotosyntézy.
- Získat přehled o běžných reálných hodnotách parametrů (na čem hodnota závisí a jaký je jejich rozsah).
- Prohloubit dovednost práce se softwarem Stella.
- Procvičit závěrečnou fázi modelování simulace – tvorba hypotéz a interpretace výstupů modelu.
- Ukázat, že stejný výstup může mít více interpretací.

#### Výstupy

##### (a) Fotosyntéza:

- Student vyjmenuje základní procesy, které hrají roli ve fotosyntéze a vysvětlí, jak jednotlivé procesy rychlost fotosyntézy ovlivňují.
- Popíše a vysvětlí vliv oxidu uhličitého a ozáření na rychlost fotosyntézy – za jakých podmínek se rychlost zvyšuje, co její rychlost omezuje.

##### (b) Matematické dovednosti:

- Student vysvětlí, jak se na grafu projeví saturace fotosyntézy oxidem uhličitým nebo světlem.
- Vysvětlí, jak se na grafu projeví změna hodnoty vodivosti nebo kvantového výtěžku.
- Simulací objeví vztah mezi hodnotou ozáření, při které dochází k saturaci fotosyntézy, a hodnotou kvantového výtěžku nebo koncentrace CO<sub>2</sub> (nezávisí/závisí a jak).

##### (c) Práce se Stellou:

- Student nastaví hodnoty parametrů v modelu, hodnoty otočného tlačítka a graf.

### Metodika

#### Příprava v rámci modelu Vyvětrej si!

Studenti si osvojí základy modelování a práce se softwarem Stella na tématu, které je všem blízké, v modelu Vyvětrej si!

#### Samotné modelování

- A) Student si přečte motivační text *Oxid uhličitý, ozáření a rostliny*. Je upozorněn, že hodnoty zadané v modelu nejsou libovolné, ale vycházejí z reality a skutečných měření. Použité hodnoty jsou shrnuty v textu *Hodnoty použité v modelu*.
- B) Samostatná práce na PC – student plní první část **úlohy 1**, kdy si projde si strukturu modelu v části modelu, *Story Telling*. Přejít do této části je možný z vrstvy *Interface*



kliknutím na tlačítko *Jak je to?* V příběhu se může student pohybovat pomocí tlačítka *Enter*.

C) Simulace: Úloha 2

**Cvičení 2.1.:**

Samostatná práce – každý student kolegům sdělí svou hypotézu a odůvodní. Samostatně ověří simulací, zda-li byla hypotéza správná.

Diskuse: Diskuse nad tím, jak simulace přispěla k odhalení nepřesností v uvažování o tématu.

Stejný způsobem pracujeme s **Cvičením 2.2.**

D) Nastavení hodnot: Úloha 3 – studenti samostatně s pomocí Manuálu Stella nastaví hodnoty na původní, vymaže výstupy dosavadní simulace a nastaví hodnoty otočného knoflíku dle instrukcí v úloze 3.

E) Simulace: Úloha 4

**Cvičení 4.1. a 4.2.:**

Samostatná práce (**4.1. a 4.2.A**): každý student kolegům sdělí svou hypotézu a odůvodní. Samostatně ověří simulací, zda-li byla hypotéza správná.

Brainstorming, diskuse nad zdůvodněním **cvičení 4.2.B.**

Stejný způsobem pracujeme s **cvičením 4.3.**

Diskuse: cvičení **4.4.**

F) Jeden výstup, kolik interpretací?

Učitel studenty upozorní na podobnost křivek z **úlohy 2.1 a 4.1**, dále **úlohy 2.2. a 4.4.** Zdůrazní, že nejen křivky, ale také modely mohou mít více interpretací. Studenti se mohou pokusit vymyslet další interpretaci, která je třeba bližší jejich životu.

**Časová náročnost**

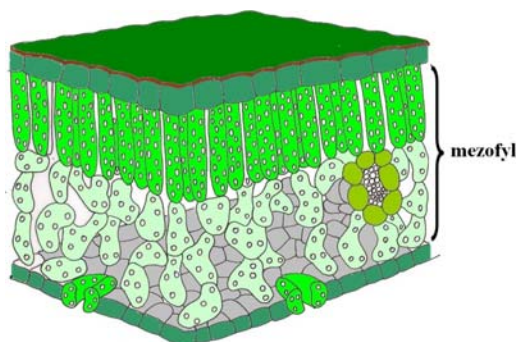
1 – 1,5 hodiny

**Literatura**

1. LORETO F., HARLEY P.C., MARCO G. Di, SHARKEY T.D.(1992): *Estimation of Mesophyll Conductance to CO<sub>2</sub> Flux by Three Different Methods*. Plant Physiol. 98, 1437-1443
2. NOBEL P.S. (2009):*Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 5th edition. Academic Press. str. 425.
3. LARCHER W.(2003): *Physiological plant ecology: Ecophysiology and stress physiology of Functional Group*. 4th edition. Springer, str. 92 - 93.

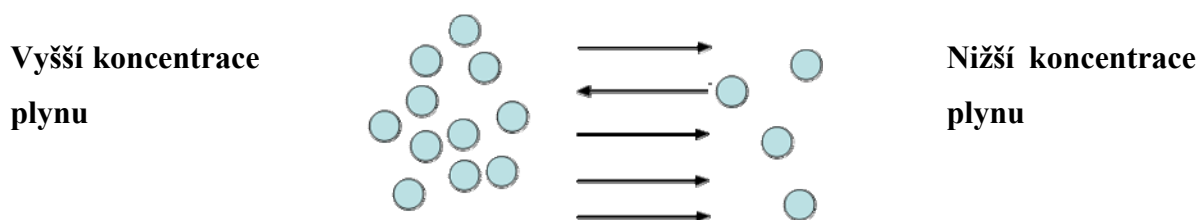
## Úvod

Zvyšování biomasy rostlin je v úzkém vztahu s dostupností oxidu uhličitého. Fotosyntetická asimilace oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) je zabudování uhlíku z molekuly  $\text{CO}_2$  do molekul sacharidů a se uskutečňuje v pletivech obsahujících chloroplasty, mezofylu – viz Obr. 1.



Obr. 1 Řez listem Rostliny C3<sup>30</sup>

Oxid uhličitý vstupuje z atmosféry do listů průduchy po koncentračním spádu, který je dán rozdílem koncentrací  $\text{CO}_2$  v okolí a uvnitř listu. Spontánní pohyb částic v prostoru po koncentračním spádu (z oblasti o vyšší koncentraci látky do místa o nižší koncentraci látky) se nazývá **difúze** – viz Obr. 1. **Vodivost** můžeme chápat jako rychlost, kterou se molekuly oxidu uhličitého přemístí z okolí do místa fixace  $\text{CO}_2$  v chloroplastu přes řadu „překážek“ na cestě.



Obr. 2 Difúze plynu z místa o vyšší koncentraci látky do místa o nižší koncentraci. Kruhy odpovídají molekulám plynu. Šipky směru difuze.

Zabudování oxidu uhličitého do organických sloučenin však vyžaduje energii, energii poskytovanou slunečním zářením. **Záření** je šíření energie prostorem. Základní jednotkou záření je foton. Kvantem rozumíme množství světelné energie nesené jedním fotonem. Přitom energie záření je závislá na vlnové délce a udává se v jednotkách joule (J). Elektromagnetické záření, které je vnímatelné lidským okem se nazývá **světlo**. Jde o oblast v rozsahu vlnových délek 380 – 780 nm. Oblast elektromagnetického záření, v níž je rozložena absorpce asimilačních pigmentů a která vyvolává v rostlinné buňce proces fotosyntézy, se nazývá

<sup>30</sup> Obr. byl zhotoven Mgr. Drahomírou Bartákovou a dále upraven ve PhotoFiltre.

**fotosynteticky aktivní radiaci (FAR).** Jde o oblast elektromagnetického záření v rozsahu vlnových délek 400 – 700 nm.

Záření dopadající na jednotku plochy libovolně orientované ke směru záření se nazývá **ozáření** a závisí na oblačnosti a čistotě ovzduší, dále pak na úhlu dopadu slunečních paprsků, tj. na zeměpisné šířce, ročním období a denní době. **Kvantový výtěžek** vyjadřuje počet molů fixovaného oxidu uhličitého při využití jednoho molu fotonů.

### **Hodnoty použité v modelu**

Běžná atmosférická koncentrace CO<sub>2</sub> se pohybuje okolo 386 ppm, zatímco koncentrace oxidu uhličitého uvnitř listu činí 70% koncentrace v atmosféře (Loreto 1992). Dodávka atmosférického oxidu uhličitého není dostatečná, aby bylo dosaženo nasycení fotosyntézy – mnohé rostliny dosahují nasycení až při 1000 ppm (Larcher 2003). V modelu se pracuje s jednotkami g(C)/m<sup>3</sup>, kdy 1000 ppm odpovídá 0.49 g(C)/m<sup>3</sup>. Model operuje na intervalu 0.1 – 0.65 g(C)/m<sup>3</sup>, kdy maximální hodnota odpovídá přibližně 1500 ppm.<sup>31</sup> Maximální průduchová (stomatální) vodivost je 0,002 – 0,009 m/s (Nobel 2009).

Oxid uhličitý vstupuje do listů z atmosféry a je v mezofylových buňkách listu enzymaticky fixován do molekul sacharidů. Metabolické dráhy fixace oxidu uhličitého závisí na množství energie, které je listem absorbováno. Intenzita záření přitom závisí na úhlu dopadu slunečních paprsků na povrch listu. Na povrch vegetace dopadá při jasné obloze průměrně 500 – 1000 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> a při zatažené obloze 50 – 200 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. Model umožňuje nastavit hodnoty ozáření od 50 – 1000 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>.

Podíl záření, který se zúročí ve fotosyntéze, vyjadřuje hodnota kvantového výtěžku. Předpokládáme-li potřebu 20 kvant pro redukci jednoho CO<sub>2</sub>, dostáváme kvantový výtěžek 0.05 mol(CO<sub>2</sub>)/mol(foton). Pro zachování konzistence jednotek, je tato hodnota převedena na 3.41 · 10<sup>-6</sup> g(C)/J(energie)<sup>32</sup>.

---

<sup>31</sup> Pro bližší vysvětlení převodních vztahů viz pracovní list Ppm a Ppm konvertor.

<sup>32</sup> Pro bližší vysvětlení převodních vztahů viz Quantum Yield.

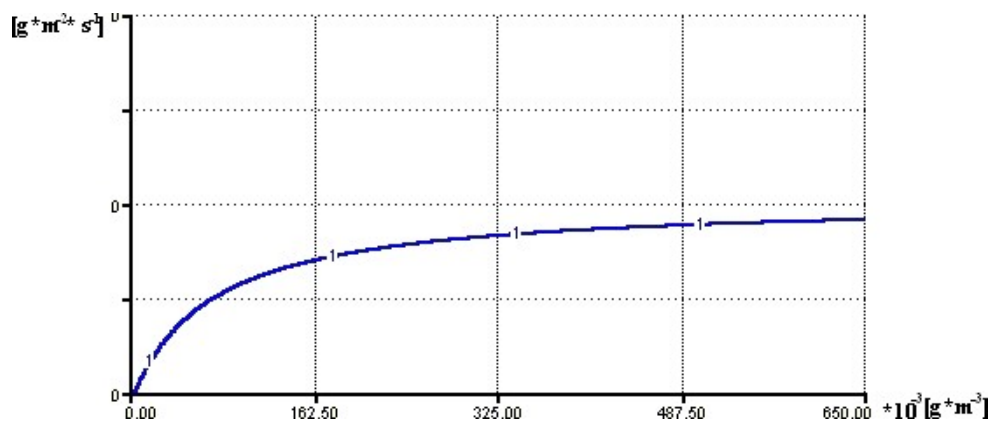
## 1. Úloha: Struktura modelu

Projděte si svým tempem strukturu modelu (klikněte na tlačítko *Jak je to?*), tak abyste pochopili, jak je model vybudován (v příběhu se pohybujte pomocí tlačítka *Enter*).

## 2. Úloha: Simulace – vliv OXIDU UHLIČITÉHO na rychlost fotosyntézy při změně ozáření

### 2.1. Závislost rychlosti fotosyntézy na koncentraci oxidu uhličitého při změně ozáření

#### 2.1.1 Vyslovte domněnku o závislosti rychlosti fotosyntézy na oxidu uhličitém a graficky vyjádřete (Page 2). Svou hypotézu zdůvodněte.



#### Zdůvodnění

Zpočátku roste rychlost fotosyntézy úměrně se zvyšující se koncentrací oxidu uhličitého ( $CO_2$ ), protože enzymy fixující  $CO_2$  mají více dostupného substrátu pro svou činnost. S nárůstem koncentrace  $CO_2$  je stále více molekul enzymu obsazeno substrátem. Rychlost enzymatických reakcí však neroste donekonečna, neboť enzymy zpracovávající substrát mohou zvyšovat výkon jen do určitého stupně, kdy jsou substrátem nasyceny. Rychlost fotosyntézy pak závisí jen na rychlosti zpracování substrátu enzymy.

Nyní můžete hypotézu ověřit simulací. Klikněte na tlačítko **Fotosyntéza** a poté na **Spustit**. Případné rozdíly se pokuste vysvětlit.

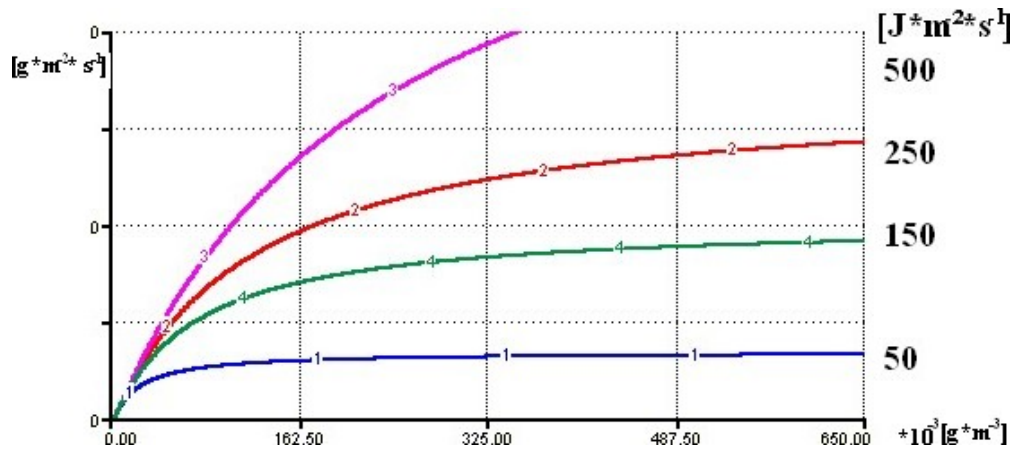
#### Závěr:

Rychlost fotosyntézy roste zpočátku přímo úměrně zvyšující se koncentrací  $CO_2$ , postupně se však rychlost snižuje, až dosáhne plató fáze, kde se rychlost mění velmi pomalu nebo vůbec.

#### 2.1.2 Jak na grafu poznáme, že dochází k saturaci fotosyntézy oxidem uhličitým?

Saturační koncentrace oxidu uhličitého je taková hodnota, při které dochází k nárůstu rychlosti fotosyntézy jen pomalu nebo vůbec. Na grafu se tedy saturace projevuje jako plató.

#### 2.1.3 Jak se změní saturace fotosyntézy oxidem uhličitým, pokud budeme zvyšovat ozáření? Svou hypotézu zdůvodněte.



### Zdůvodnění:

*Při vysoké ozáření je pro rychlou fixaci CO<sub>2</sub> poskytováno dostatek energie, zatímco při nízké ozáření nemůže být veškerý dostupný CO<sub>2</sub> využit pro zabudování do organických látek.*

**Nyní můžete hypotézu ověřit simulací. Případné rozdíly se pokuste vysvětlit.**

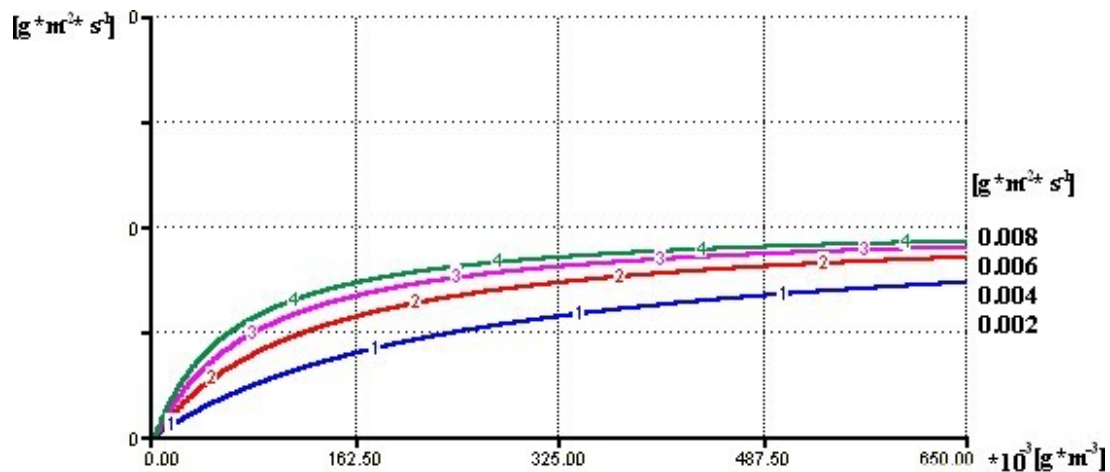
### Závěr:

*Hodnota, při které dochází k saturaci fotosyntézy CO<sub>2</sub>, je vyšší se zvyšující se ozáření.*

## **2.2. Vodivost**

Vodivost můžeme chápat jako rychlost, kterou se molekuly CO<sub>2</sub> přemístí z okolí do místa fixace CO<sub>2</sub> (karboxylace) v chloroplastu přes řadu „překážek“ neboli odporů na cestě. Hodnoty vodivosti se pohybují v rozmezí 0.002 – 0.009 [m/s]. Uvažujme průměrnou ozáření při zatažené obloze, tj. 150 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>.

### **2.2.1 Vyslovte hypotézu, jak se bude měnit hodnota saturace fotosyntézy oxidem uhličitým při změně vodivosti a zdůvodněte.**



Zdůvodnění:

*Vodivost ovlivňuje rychlost difúze  $CO_2$  do místa jeho fixace (karboxylace), a tím dostupnost substrátu pro enzymatickou reakci.*

**2.2.2 Nastavte postupně různou hodnotu vodivosti na intervalu 0.002 – 0.009 a pozorujte na grafu, jak se změní hodnota saturace fotosyntézy oxidem uhličitým. Jaké nepřesnosti ve vašem uvažování simulace odhalila?**

Závěr:

*Hodnota koncentrace  $CO_2$ , při které dochází k saturaci fotosyntézy, se příliš při změně hodnoty vodivosti nemění.*

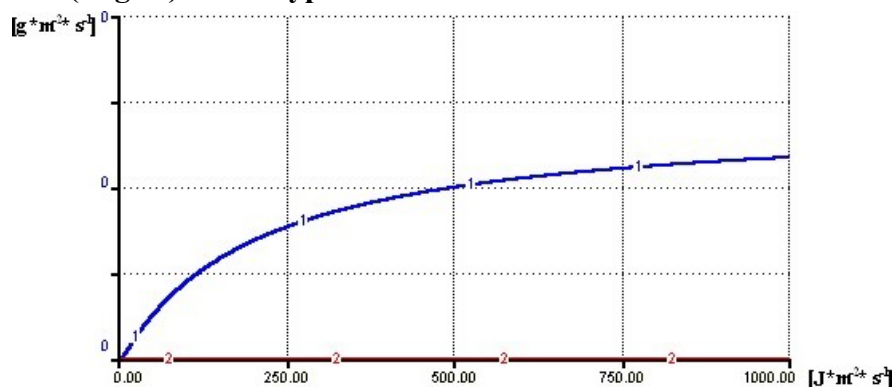
**2.2.3 Jak se změna vodivosti projevuje na grafu?**

*Čím je hodnota vodivosti vyšší, tím je strmější ta část grafu, kde rychlost fotosyntézy roste s koncentrací oxidu uhličitého lineárně.*

### 3. Úloha: Simulace – vliv OZÁŘENOSTI na rychlost fotosyntézy při změně koncentrace oxidu uhličitého

#### 3.1. Závislost rychlosti fotosyntézy na ozáření při změně koncentrace oxidu uhličitého

##### 3.1.1 Vyslovte domněnku o závislosti rychlosti fotosyntézy na ozáření a graficky vyjádřete (Page 2). Svou hypotézu zdůvodněte.



##### Zdůvodnění:

*Jsou-li listy vystavené vysoké ozáření, roste rychlost fotosyntézy (tj. množství fixovaného  $CO_2$ ) zpočátku úměrně s ozáření, protože metabolické dráhy mají více dostupné energie pro fixaci  $CO_2$ . Limitujícím faktorem celého procesu fotosyntézy je v této fázi rychlost světelných reakcí.*

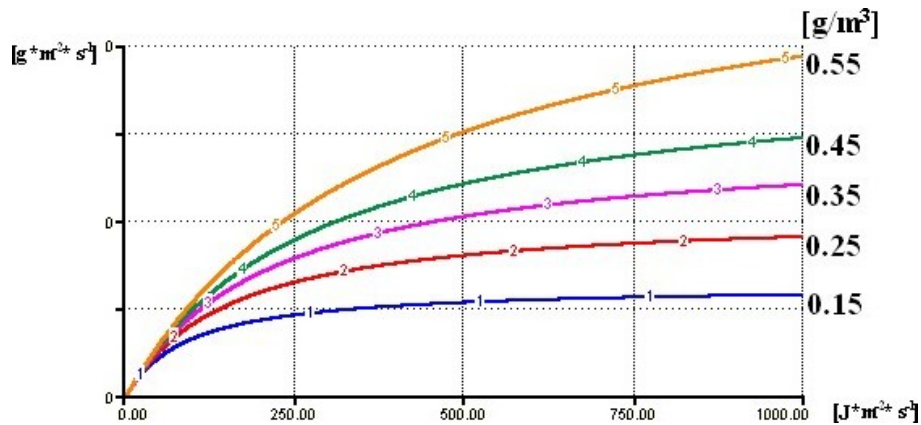
*Rychlost však neroste donekonečna, neboť při vysoké ozáření není dostatek specializovaných molekul chlorofylu, které by dostupnou energii zpracovaly. Neboli světelná fáze fotosyntézy je nasycena. Limitujícím faktorem procesu fotosyntézy jsou nadále enzymatické reakce temnotní fáze a dostupnost oxidu uhličitého.*

**Nyní můžete hypotézu ověřit simulací. Případné rozdíly se pokuste vysvětlit.**

##### Závěr:

*Rychlost fotosyntézy roste zpočátku přímo úměrně zvyšující se ozáření, postupně se však rychlost snižuje, až dosáhne plató fáze, kde se rychlost mění velmi pomalu nebo vůbec.*

##### 3.1.2 Jak se mění saturační hodnota světla pokud budeme zvyšovat hodnotu koncentrace $CO_2$ v atmosféře nad běžnou hodnotu až po 1500 ppm ( $0.65g(C)/m^3$ ). Svou hypotézu zdůvodněte.



### Zdůvodnění:

Vysoká ozáření může zajistit vysokou rychlost fotosyntézy, pokud má dostatek substrátu, oxidu uhličitého. Je-li substrátu nedostatek, nemůže být dostupná energie ve fotosyntéze využita a nadbytek absorbované energie je rozptýlen např. ve formě tepla.

Nyní můžete hypotézu ověřit simulací. Případné rozdíly se pokuste vysvětlit.

### Závěr:

Se zvyšující se koncentrací  $CO_2$  se zvyšuje také hodnota ozáření, při které je dosaženo nasycení fotosyntézy, tj. vyšší plató.

**3.1.3 Listy, které se vyvíjely za vysoké ozáření (např. listy horních pater porostu) mívají hodnotu saturace fotosyntézy světlem vyšší (okolo  $200 - 250 J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), než listy, které se vyvíjely při nižší ozáření, např. listy ve spodních vrstvách porostu (okolo  $100 J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Čím jsou tyto rozdíly dány?**

**Fotosystémy** (struktury ukotvená v membráně thylakoidů chloroplastů, které se podílejí na přenosu elektronů) obsahují několik specializovaných molekul chlorofylu, které mohou uvolnit elektrony o vysoké energii. Na každou takovou specializovanou molekulu chlorofylu připadá 200 – 300 nespecializovaných molekul chlorofylu, které se dostávají do světlem navozeného excitovaného stavu a svou energii předávají specializovaným molekulám chlorofylu. Při nízké ozáření je třeba mnoha molekul chlorofylu, aby byla potřebná energie nashromážděna. Při vysoké ozáření však není dostatek specializovaných molekul, aby mohly zpracovat dostupnou energii. Proto mají slunné listy méně ne-specializovaných molekul, a tím vyšší bod saturace fotosyntézy světlem, i když efektivita využití světla je nižší.

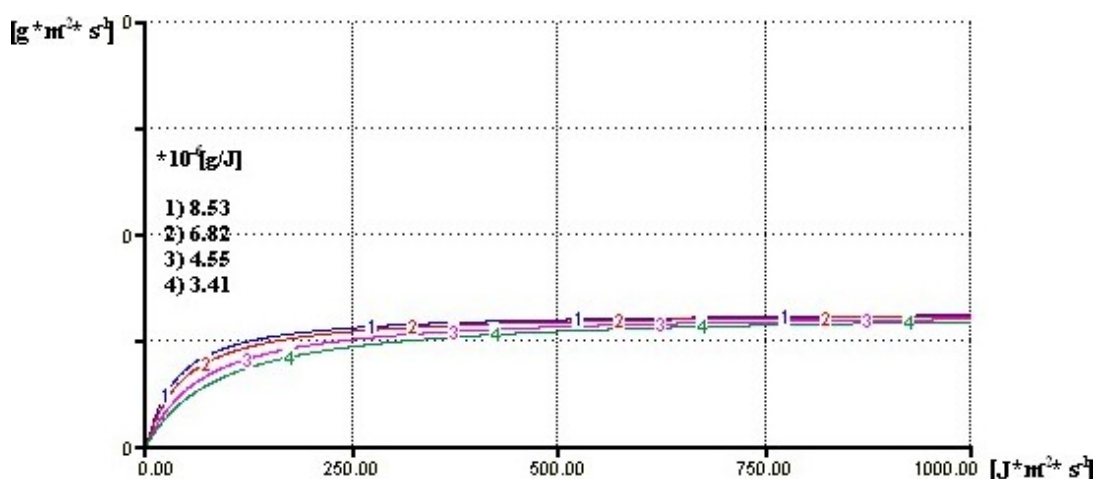
Druhým důvodem je dostupnost oxidu uhličitého. Při vysoké ozáření rychlá fotosyntéza vyčerpá oxid uhličitý uvnitř listu a produkuje se velké množství kyslíku, což jsou podmínky, které podporují fotorespiraci.

## **3.2. Kvantový výtěžek**

Teoretický počet kvant pro fixaci 1 molu  $CO_2$  ( $44 g CO_2$ ) byl spočítán na 8 kvant, což představuje kvantový výtěžek  $8.53 \cdot 10^{-6} g(C)/J(\text{energie})$ . Přitom se předpokládá, že kvanta jsou beze zbytku využita. Reálnější by nicméně bylo počítat s 20 kvanty světla, což představuje výtěžek  $3.41 \cdot 10^{-6} g(C)/J(\text{energie})$ .

**3.2.1 Vyslovte hypotézu, jak se bude měnit hodnota, při které dojde k saturaci fotosyntézy světlem, pokud budeme zvyšovat hodnotu kvantového výtěžku. Svou hypotézu zdůvodněte.**





### Zdůvodnění:

Kvantový výtěžek představuje efektivitu, s jakou je absorbovaná energie ve fotosyntéze využita. Při vyšší efektivitě využití záření, dosáhne rychlost fotosyntézy (saturace světlem) plató rychleji, než při nižší efektivitě.

### **3.2.2 Nastavte postupně různou hodnotu vodivosti na intervalu 3.41 – 8.53 a na grafu pozorujte, jak se změní hodnota saturace fotosyntézy oxidem uhličitým. Jaké nepřesnosti ve vašem uvažování simulace odhalila?**

#### Závěr:

Hodnota ozáření, při které dochází k saturaci fotosyntézy, se příliš při změně hodnoty kvantového výtěžku nemění.

### **3.2.3 Jak se změna kvantového výtěžku projevuje na grafu?**

Čím je kvantový výtěžek vyšší, tím je strmější ta část grafu, kde rychlost fotosyntézy roste s ozářeností lineárně.

## **3.3. Fáze fotosyntézy**

### **3.3.1 Rozlišujeme dvě fáze fotosyntézy. Které to jsou a co je jejich podstatou?**

Světelná a temnostní fáze fotosyntézy. Ve světelné fázi dochází k absorpci záření a uložení energie záření do energie chemických vazeb. V temnostní fázi je pak tato energie využita v metabolických drahách zabudování atmosférického oxidu uhličitého do organických látek.

### **3.3.2 Projevují se tyto části nějakým způsobem na grafu? Které části grafu případně jednotlivým fázím fotosyntézy odpovídají?**

Světelná fáze fotosyntézy odpovídá té části grafu, kde rychlost fotosyntézy roste s ozářeností lineárně. Temnostní fáze fotosyntézy odpovídá té části grafu, kde rychlost fotosyntézy nabývá jen pozvolna nebo vůbec.

### **3.3.3 Rozhodněte, které rostliny mají vyšší saturační bod: a) Rostliny C4, b) Rostliny C3. Proč?**

Saturace fotosyntézy světlem je vedle nasycení světelné reakce fotosyntézy ovlivněna též fotorespirací. Vyšší bod saturace fotosyntézy světlem budou mít Rostliny C4, protože oxid uhličitý, který se uvolní fotorespirací se znovu asimiluje před tím, než může uniknout.

## 9.3. Cvičení k prezentaci do úvodu modelování

### 9.3.1. Základy modelování – Gramatická pravidla

#### Jak správně modelovat v softwaru Stella – Gramatická pravidla

##### Zviditelnění mentálních modelů




V běžném životě si člověk vytváří mentální modely každý den. Např. když řeším problém, jaké šaty vyberu pro svou dceru, také se s ní nemusím setkat osobně, abych o ní mohla uvažovat. Při úvahách o dceři a šatech vyberu ve svém mentálním modelu ty znaky, které se hodí pro řešení mého problému. Mohou to být barva vlasů, očí, výška nebo váha. Jakmile mám vybrané prvky, jež je důležité do modelu zahrnout, mohu definovat vztahy mezi těmito prvky – kombinaci barev, střihu, délky šatů nebo sukně apod. Výsledky, které dostanu simulací musím opět převést do kontextu reálné situace – výsledkem jsou např. žluté šaty s délkou pod kolena. Výsledek nicméně musíme kriticky zhodnotit, zda je reálný a dané šaty se opravdu na dceru hodí nebo je výběr příliš „divoký“. Na základě simulace a získaných výsledků tedy můžeme model dále upravovat, až získáme model, jež dává smysluplné výstupy.

##### Hlavní stádia modelování

Hlavní stádia modelování demonstrováné na výše uvedeném příkladu můžeme shrnout následovně:

1. Stanovíme reálný problém
2. Vybereme důležité prvky, které budou součástí modelu
3. Rozhodneme, jak budeme tyto prvky a vztahy mezi nimi reprezentovat (např. ve Stelle systémem zásobníků, toků a konvertorů).
4. Simulací získáme určité výstupy (graf, tabulkové hodnoty), které si zaznamenáme a zkusíme interpretovat v původním kontextu.
5. Zhodnotíme reálnost výstupů a na případně model upravíme, aby jeho výstupy více odpovídaly skutečnosti (výstupy můžeme porovnat např. s výsledky vědeckých experimentů).
6. Dobře pracující model můžeme využít k predikci nebo rozhodnutí.

##### Základní stavební prvky jazyku Stella

Jazyk Stella má, stejně jako ostatní jazyky, slovní druhy a gramatická pravidla pomocí níž může tvořit věty. Základními stavebními prvky jsou zásobníky , toky  (mráčky na začátku a na konci šipky značí, že nás nezajímá počátek ani konec) a převaděče . Prvek, který zajišťuje propojení jednotlivých elementů v modelu, jsou spojky (červené šipky).

**Zásobníky** zastupují roli podstatných jmen. Tvar obdélníku byl zvolen, aby uživatelům připomněl nádrž, ve které se něco shromažďuje nebo nádrž, která se vyčerpává. Užíváme je proto tehdy, pokud chceme zdůraznit, že se jedná o akumulaci nějaké látky (hmotné i nehmotné – např. voda nebo hněv). Pokud jsou připojeny na tok, mají stejné jednotky až na jednotku času.

**Toky** zastupují roli sloves. Značka toku má připomínat potrubí, kterým látka (hmotná i nehmotná) protéká. Je-li hodnota toku nastavená na nulu, je tok potrubím nulový neboli kohoutek je uzavřen. Toky tak užíváme pro reprezentaci procesů (např. rychlost, difúze, nárůst hněvu apod.) a je v nich tedy zahrnut prvek času.

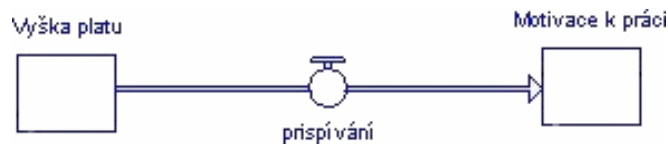
Proces může být spuštěn jiným procesem nebo vnějším zdrojem (zásobník). Tok může být použit také v případě, chceme-li znázornit pasivní vyčerpání zdroje.

**Převaděče** zastupují roli příslovce neboli mění objem toku procesu. Často se používají, chceme-li vyjádřit efektivitu nebo produktivitu procesu. Slouží též jako konstanta. Převaděč má nicméně ještě řadu dalších funkcí – může být „schránkou“ pro algebraické operace sčítání a násobení, můžeme jej využít místo zásobníků nebo toků, pokud to slouží k větší přehlednosti modelu (ale pozor na tvorbu mrtvého buvola!!!).

## Gramatická pravidla

Jednotlivé prvky jazyka Stella nelze zcela libovolně poskládat. Podobně jako jiné jazyky má i Stella svá vlastní gramatická pravidla, která nám umožní, aby napsané věty byly všem srozumitelné. Nebudeme-li tato gramatická pravidla respektovat, vzniknou divoká vyjádření, kterým druzí rozumět nemusí nebo si je vysvětlí špatně, jak ukazují následující příklady.

### 1) Gramatické pravidlo 1:.....



a) Napište, jaký byl pravděpodobný „pisatelův“ záměr. Co tímto modelem chtěl „básník“ vyjádřit?

.....

b) Simulací modelu zjistíte, v čem je toto vyjádření absurdní.

.....

c) Jaký základní nedostatek nám simulace odhalila?

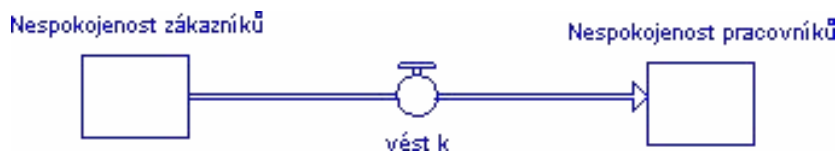
.....

### 2) Gramatické pravidlo 2: Zákon zachování hmoty a energie



Příklad ukazuje, jak můžeme toto pravidlo ve Stelle legálně porušit. Víme, že člověk vzniká oplozením vajíčka, ale pro účely modelování není důležité, odkud člověk pochází (proto mráček na počátku šipky – „spadnul z nebe“).

### 3) Gramatické pravidlo 3:.....



a) Uveďte jednotky. Je splněna konzistence jednotek?

.....

b) Napište, jaký byl pravděpodobný „pisatelův“ záměr. Co tímto modelem chtěl „básník“ vyjádřit?

.....

c) Simulací modelu zjistěte, v čem je toto vyjádření absurdní.

.....  
.....

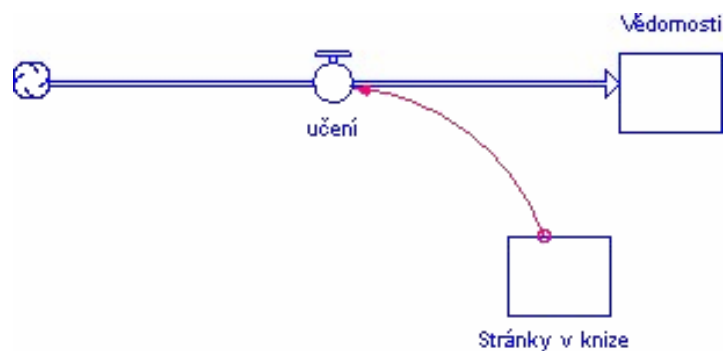
d) Jaký základní nedostatek nám simulace odhalila?

.....  
.....

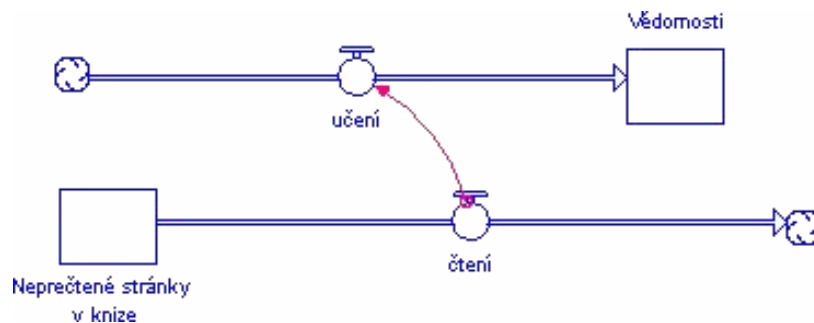
#### 4) Vyjádření přirozenosti procesu

Následující modely si nekladou za cíl popsat daný jev v jeho komplexnosti, jedná se o výrazné zjednodušení pohledu na proces učení, do kterého nebylo zahrnuto mnoho dalších aspektů. Cílem je demonstrovat princip modelování a to zachycení přirozenosti určitého procesu.

A)



B)



a) Jakým způsobem budete v každém z případů navyšovat množství vědomostí?

.....  
.....

b) Podívejte se na případ B. Všimnete si nějaké nesrovnalosti?

.....  
.....

c) Navrhněte způsob, jak nedostatek odstranit.

.....  
.....

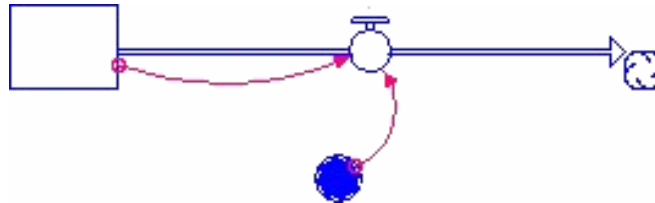
### 9.3.2. Základy modelování – Obecné modely

#### Jak správně modelovat v softwaru Stella – Obecné modely

V modelování nejrůznějších systémů se často uplatňují jevy, které můžeme reprezentovat podobným modelem.

##### 1) Proces pasivního vyčerpávání zdroje

Navrhněte další jevy, které sedají vyjádřit stejným modelem – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek.



Jednotky:

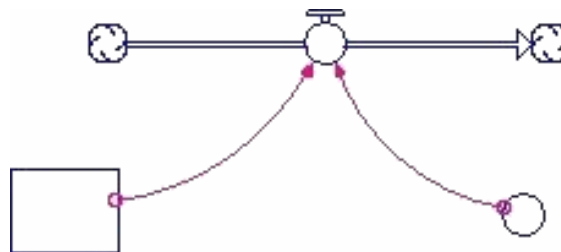
.....

.....

.....

##### 2) Proces je katalyzován vnějším zdrojem

Navrhněte další příklady, které se hodí na tento případ – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek. Dle svých potřeb přidejte (dokreslete) zásobník na levé nebo pravé straně toku.



Jednotky:

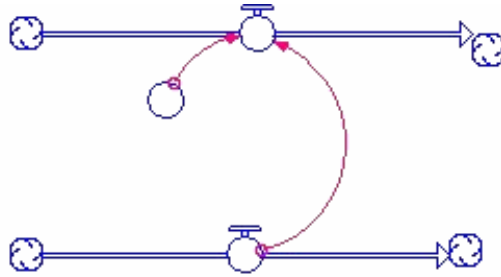
.....

.....

.....

### 3) Proces je řízen jiným procesem

Navrhněte další příklady, které se hodí na tento případ – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek. Dle svých potřeb využijte další prvky – tok, zásobníky, převaděč.

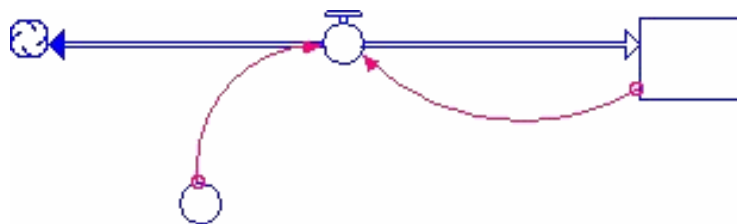


Jednotky:

.....  
.....

### 4) Proces, který sám sebe posiluje na základě zpětné vazby

Navrhněte další příklady, které se hodí na tento případ – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek.

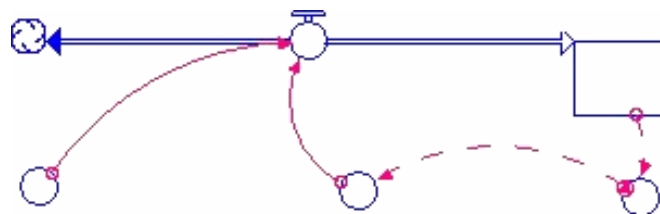


Jednotky:

.....  
.....

### 5) Proces, kde se zásobník přizpůsobí cílové hodnotě

Navrhněte další příklady, které se hodí na tento případ – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek.

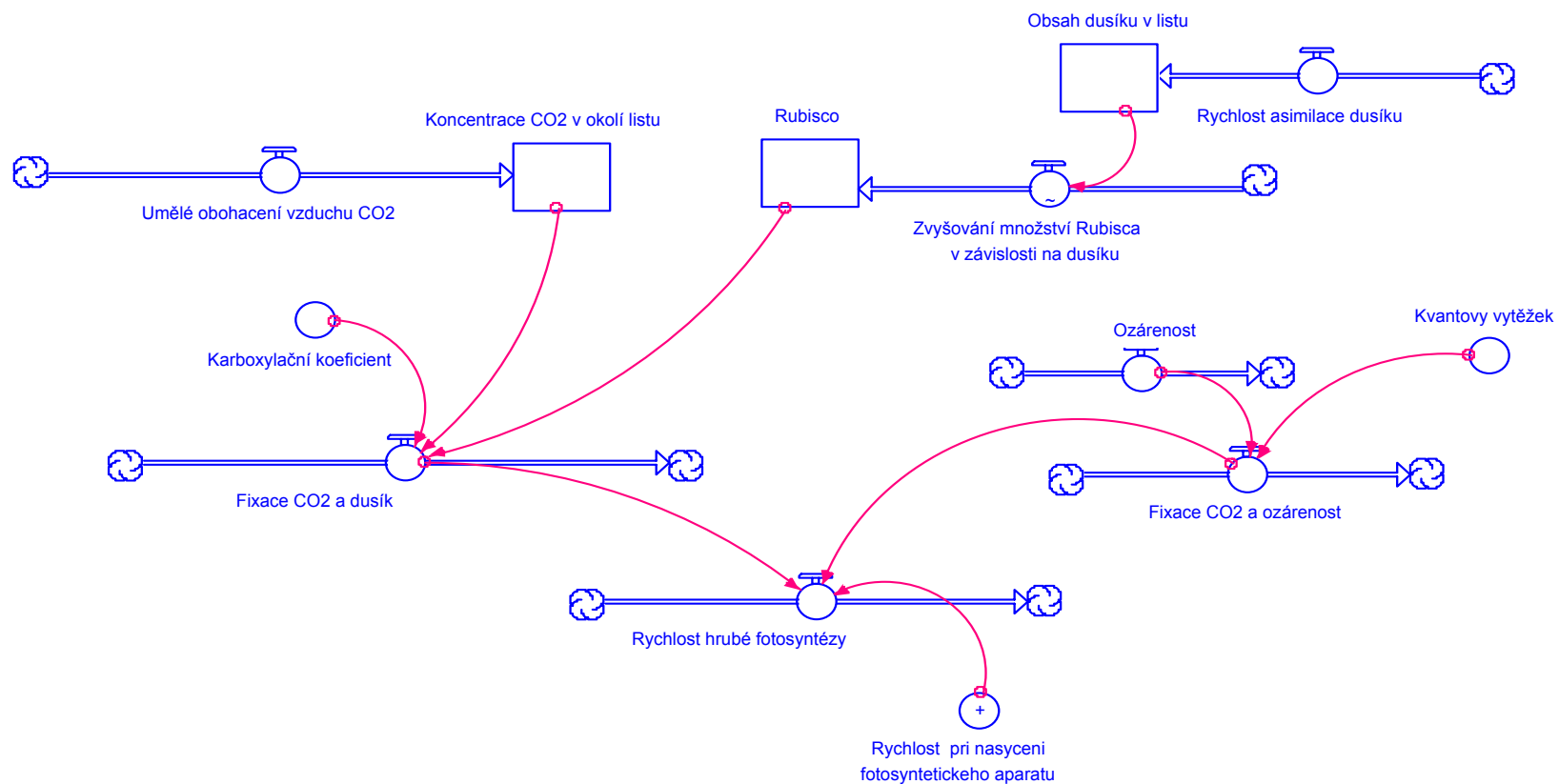


Jednotky:

.....  
.....

## Model vlivu obsahu dusíku v listech na rychlost hrubé fotosyntézy

Zakroužkujte v modelu obecné sub-modely.





(1) Proč jsou oxid uhličitý a Rubisco znázorněny jako zásobník? Který z nich katalyzuje proces?

.....  
.....

(2) Jakou roli v tomto sub-modelu hraje karboxylační koeficient?

.....  
.....

(3) Proč bychom měli mít zájem na obohacení vzduchu oxidem uhličitým?

.....  
.....

(4) Proč je ozáření znázorněna jako tok?

.....  
.....

(5) Jakou roli v tomto sub-modelu hraje kvantový výtěžek?

.....  
.....

(6) Tipněte si, kolik % celkového obsahu dusíku v listech je investováno do fotosyntetického aparátu.

.....  
.....

(7) V jakém vztahu je obsah dusíku v listech a množství Rubisca?

.....  
.....

## 9.4. Řešení cvičení k prezentaci

### 9.4.1. Základy modelování – Gramatická pravidla

#### 1) Gramatické pravidlo 1: Konzistence jednotek



- a) Napište, jaký byl pravděpodobný „pisatelův“ záměr. Co tímto modelem chtěl „básník“ vyjádřit?

*Výška platu přispívá k motivaci výkonu práce.*

- b) Simulací modelu zjistěte, v čem je toto vyjádření absurdní.



*Abychom zvýšili motivaci k práci, musíme snížit platy.*

- c) Jaký základní nedostatek nám simulace odhalila?

*Simulace odhalila v první řadě nekonzistenci jednotek. Pisatel tedy zřejmě využívá toku čistě jako znak kauzality. Zatímco tento model popisuje vztah mezi akumulací (zásobníkem) a tokem, který zásobník naplňuje nebo ho vyčerpává.*

#### 2) Gramatické pravidlo 2: Zákon zachování hmoty a energie



Příklad ukazuje, jak můžeme toto pravidlo ve Stelle legálně porušit. Víme, že člověk vzniká oplozením vajíčka, ale pro účely modelování není důležité, odkud člověk pochází (proto mráček na počátku šipky – „spadnul z nebe“).

#### 3) Gramatické pravidlo 3: Nekonzervovat nehmotné množství s výjimkou času



- a) Je splněna konzistence jednotek?

*Jednotky jsou nespokojenost.*

b) Napište, jaký byl pravděpodobný „pisatelův“ záměr. Co tímto modelem chtěl „básník“ vyjádřit?

*Pocity nespokojenosti u zákazníků mohou vyvolat podobné pocity u pracovníků.*

c) Simulací modelu zjistíte, v čem je toto vyjádření absurdní.

*Zákazníci nepředávají svou nespokojenost pracovníkům (není to nemoc). Nesrovnalost následně odhalí mentální simulace.*

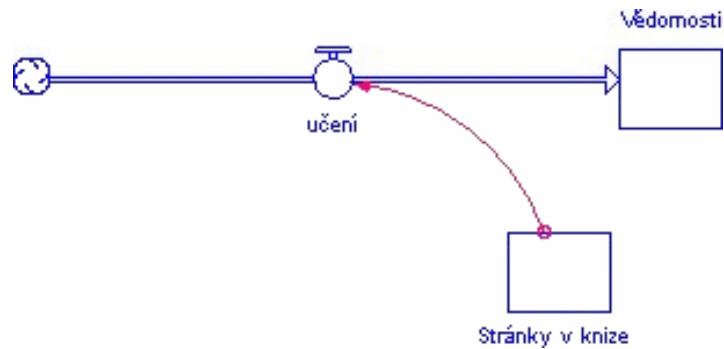
d) Jaký základní nedostatek nám simulace odhalila?

*Simulace odhalila, že jsme se snažili konzervovat nehmotné množství.*

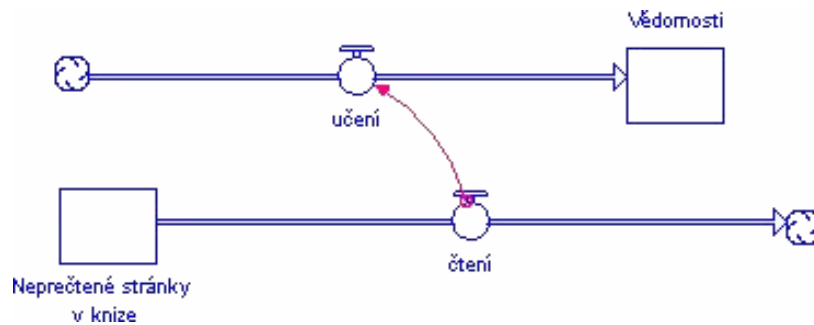
#### 4) Vyjádření přirozenosti procesu

Následující modely si nekladou za cíl popsat daný jev v jeho komplexnosti, jedná se o výrazné zjednodušení pohledu na proces učení, do kterého nebylo zahrnuto mnoho dalších aspektů. Cílem je demonstrovat princip modelování a to zachycení přirozenosti určitého procesu.

A)



B)



a) Jakým způsobem budete v každém z případů navyšovat množství vědomostí?

A) *Vědomosti se navyšují pouze přidáváním stránek do knihy, přičemž samotná přítomnost stránek zajistí nárůst vědomostí.*

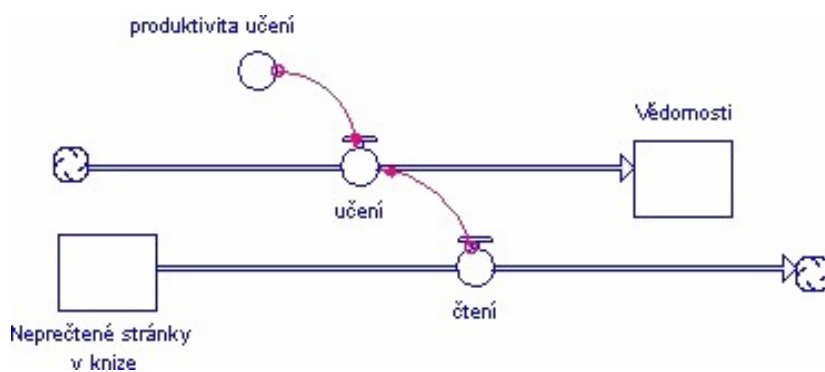
B) *Abychom se něco naučili, musíme být aktivní – číst. Přestanu-li číst, přestanu se učit.*

**b) Podívejte se na případ B ještě jednou. Všimnete si nějaké nesrovnalosti?**

*Jednotky jsou nekonzistentní: znalosti/čas, resp. stránka/čas. Možná vás zároveň napadá, že každý člověk dokáže čtením „vytěžit“ jiný objem vědomostí v závislosti na věku, vědomostech vztahujících se k tématu, motivaci k čtení apod.*

**c) Navrhněte způsob, jak nedostatek odstranit.**

*Využijeme třetího stavebního prvku jazyka Stella – konvertor, který představuje efektivitu čtení ve vztahu k získávání vědomostí.*

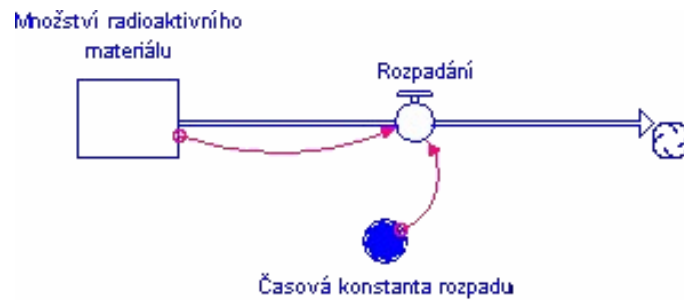


Nyní jsou jednotky konzistentní:

$$\begin{aligned} \text{učení} &= \text{čtení} * \text{produktivita učení} \\ [\text{znalosti/čas}] &= [\text{stránka/čas}] * [\text{znalosti/stránka}] \end{aligned}$$

## 9.4.2. Základy modelování – Obecné modely

### 1) Proces pasivního vyčerpávání zdroje



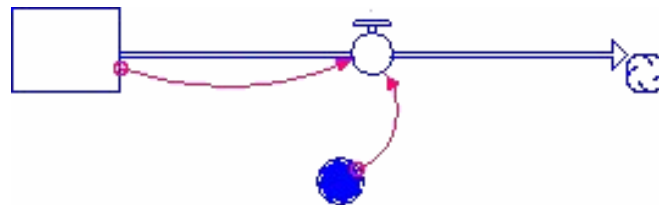
Tento model reprezentuje proces pasivního vyčerpávání zdroje (zásobník). Proces je definován jako výsledek množství zásoby a podílu jeho ztráty nebo časové konstanty (průměrná doba, po kterou jednotka zůstane v zásobníku).

Jednotky:

$$\begin{aligned} \text{Rozpadání} &= \text{Množství radioaktivního materiálu} / \text{Časová konstanta rozpadu} \\ [\text{materiál}/\text{čas}] &= [\text{materiál}] / [\text{čas}] \end{aligned}$$

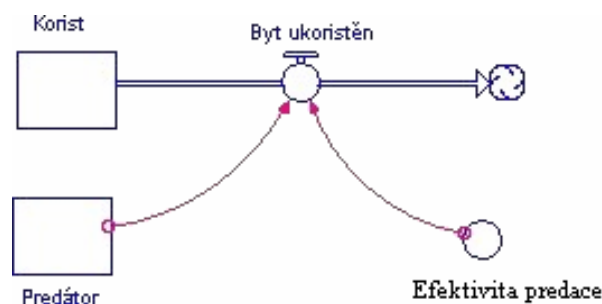
#### Cvičení 1

*Navrhněte další jevy, na které lze použít stejný model. Nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek.*



Např. Ztráta nadšení pro věc nebo difúze vody z buňky do prostředí o vyšší koncentraci látky.

### 2) Proces je katalyzován vnějším zdrojem (External Resource)

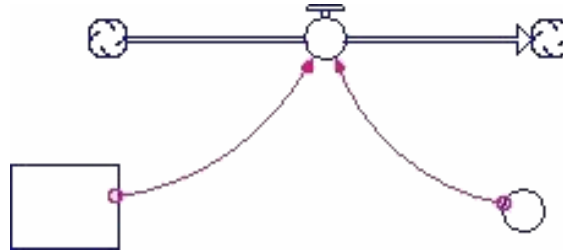


Kořist (zásobník), ke kterému je proces vázán (být ukořistěn) nezpůsobuje tento proces. Pohyb procesu zajišťuje vnější zdroj, predátoři. Efektivita predace vypovídá o počtu kořistí ulovených za jednotku času na jednoho predátora.

$$\begin{aligned} \text{Být ukořistěn} &= \text{Predátor} * \text{Produktivita predátorství} \\ [\text{kořist}/\text{čas}] &= [\text{predátor}] * [\text{kořist}/(\text{predátor} \cdot \text{čas})] \end{aligned}$$

## Cvičení 2

Navrhněte další příklady, které se hodí na tento případ – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek. Dle svých potřeb přidejte zásobník na levé nebo pravé straně toku.

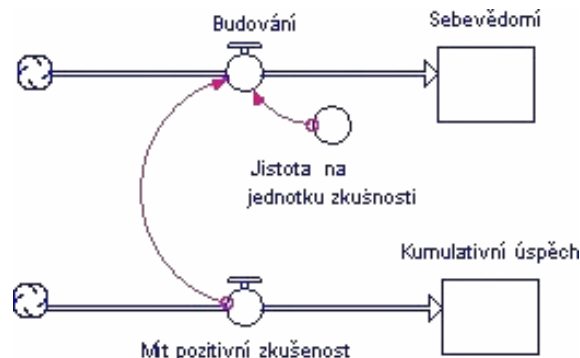


Např.

(a) Proces vytváření kódu programátory (vnější zdroj), za vzniku stránek s kódy (zásobník napravo vázaný na proces). Rychlost procesu je ovlivňována produktivitou vytváření kódu (počet stránek vytvořených programátorem za jednotku času)

(b) Proces čerpání podzemního oleje, kdy se hromadí olej v zásobních cisternách (zásobníky na obou stranách). Vnějšími zdroji, který proces čerpání oleje umožňuje, jsou pumpy. Proces čerpání je ovlivněn produktivitou pumpování (množství litrů oleje přečerpáné pumpou za jednotku času).

### 3) Proces je řízen jiným procesem (Co-flow)

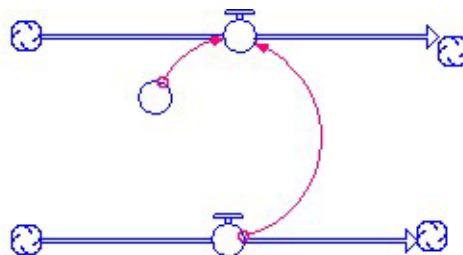


Primární proces je řízen jiným procesem a konvertor zde figuruje jako zhodnocení .

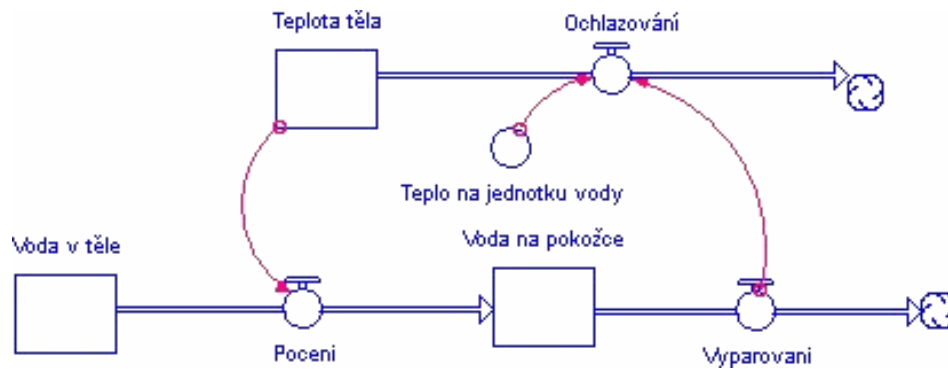
$$\begin{aligned} \text{Jednotky: } \quad \text{Budování} &= \text{Mít pozitivní zkušenost} * \text{Jistota na jednotku zkušenosti} \\ [\text{jistota}/\text{čas}] &= [\text{zkušenost}/\text{čas}] * [\text{jistota}/\text{zkušenost}] \end{aligned}$$

## Cvičení 3

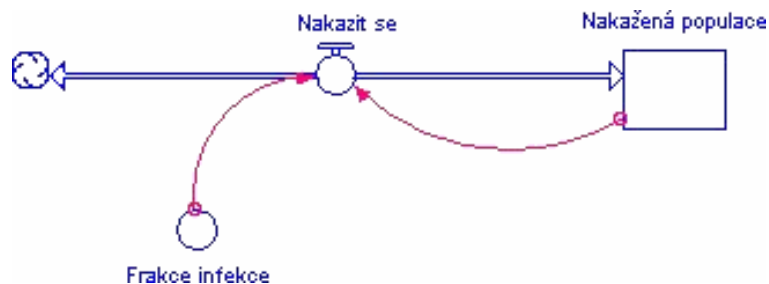
Navrhněte další příklady, které se hodí na tento případ – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek. Dle svých potřeb využijte další prvky – tok, zásobníky, konvertor.



Např. regulace tělesné teploty pocením



4) Proces, který sám sebe posiluje na základě zpětné vazby



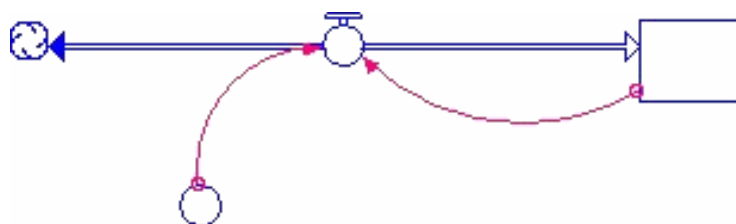
Model reprezentuje situaci, ve které se proces rozproudí na základě působení naakumulovaných jednotek v zásobníku, do kterého ústí. Proces je definován jako výsledek dvou vstupů – zásobníku (infikovaná populace) a frakce nakažených, která představuje počet lidí, kteří se nakazí od osoby v nakažené populaci. Tj. obecně frakce vypovídá o počtu nových jednotek vyprodukovaných jednotkou ze zásobníku na jednotku času.

Jednotky:

$$\begin{aligned} \text{Nakazit se} &= \text{Nakažená populace} * \text{Frakce infekce} \\ [\text{materiál}/\text{čas}] &= [\text{materiál}] * [\text{osoby}/(\text{osobu} \cdot \text{čas})] \end{aligned}$$

**Cvičení 4**

*Navrhněte další příklady, které se hodí na tento případ – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek.*



Např. Vzrůst paniky apod.

### 5) Proces, kde se zásobník přizpůsobí cílové hodnotě

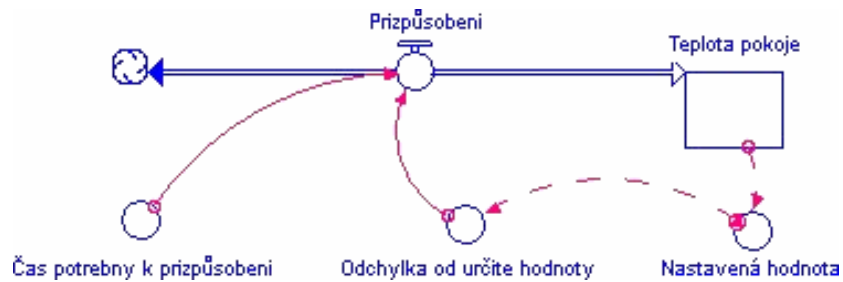


Schéma reprezentuje situace, ve kterém se zásobník přizpůsobuje určité hodnotě. Proces se dá do pohybu, kdykoli vznikne rozpor mezi vlastností zásobníku a požadovanou hodnotou. Proces je definován násobením rozdílu mezi stávající a cílovou hodnotou (teplota pokoje a nastavená hodnota).

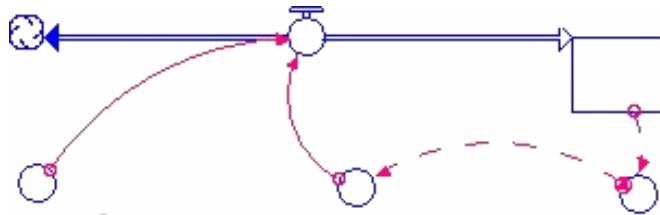
Jednotky:

Přizpůsobení = Odchylka od určité hodnoty / Časová konstanta přizpůsobení

[Stupeň/čas] = [Stupeň] / [čas]

#### **Cvičení 5**

**Navrhněte další příklady, které se hodí na tento případ – nezapomeňte zkontrolovat konzistenci jednotek.**

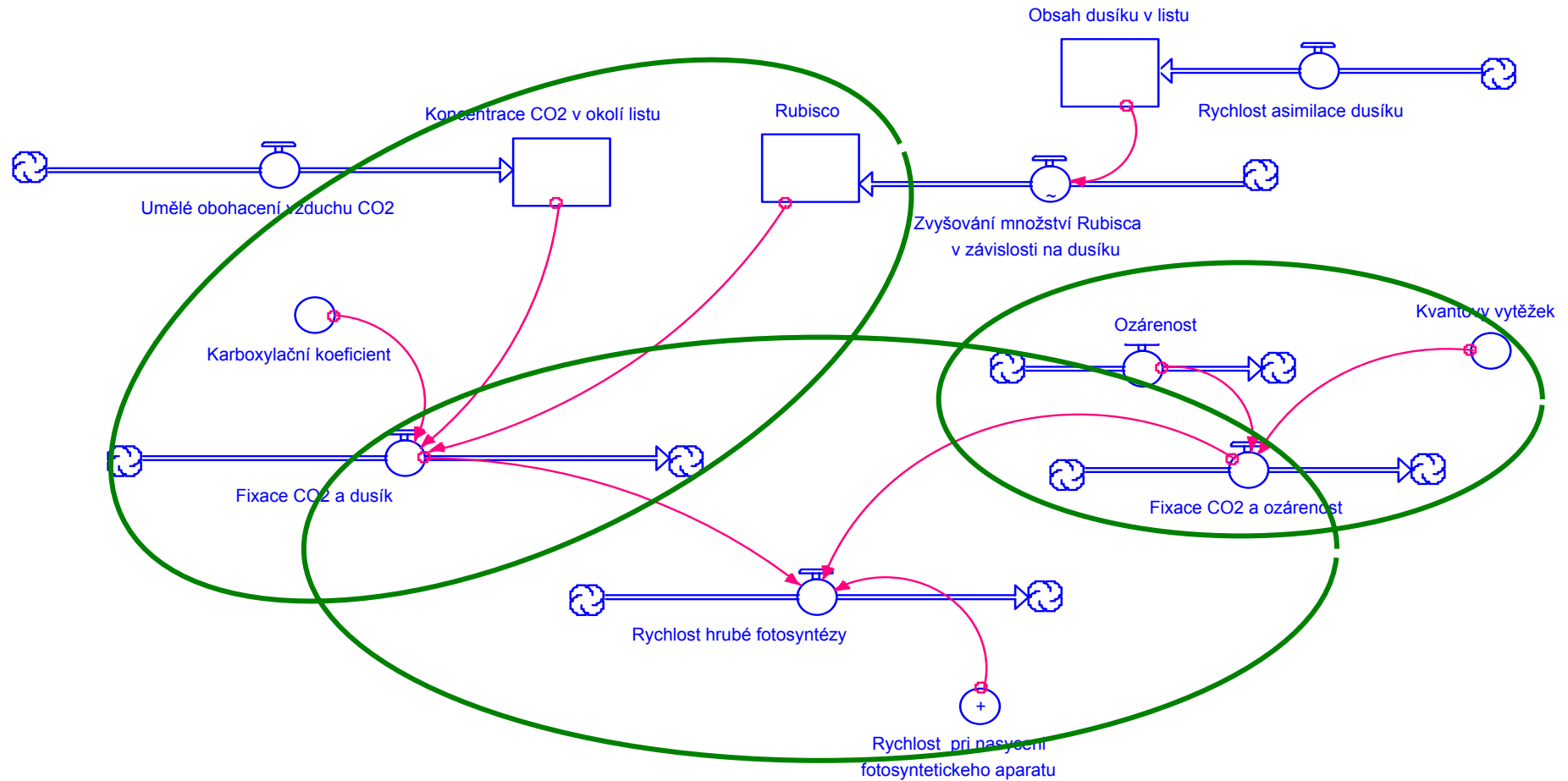


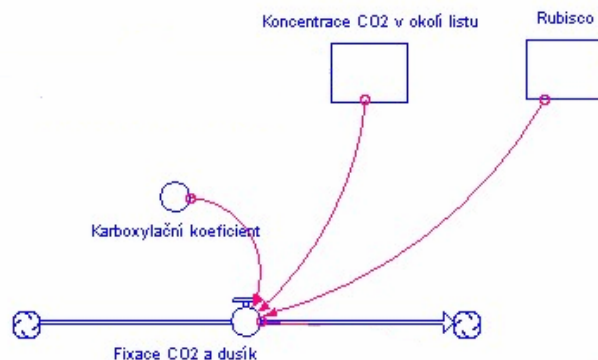
Např. Nabírání nové pracovní síly nebo proces změny úrovně pohodlí.



## Model vlivu obsahu dusíku v listech na rychlost hrubé fotosyntézy

1) Zakroužkujte v modelu obecné sub-modely.



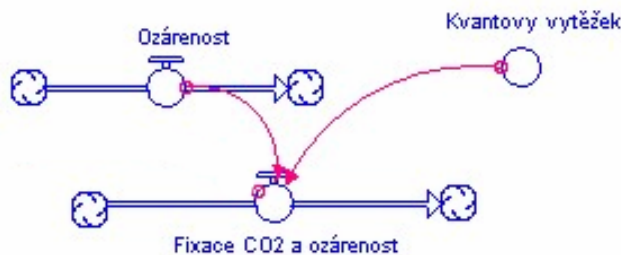


Enzym Rubisco je vnější zdroj, který aktivizuje proces primární fixace oxidu uhličitého (karboxylace) – je „motorem“ pohánějící proces. Enzym zpracovává oxid uhličitý určitou rychlostí. Rychlost fixace  $\text{CO}_2$  enzymem Rubisco závisí na dostupnosti substrátu, oxidu uhličitého.

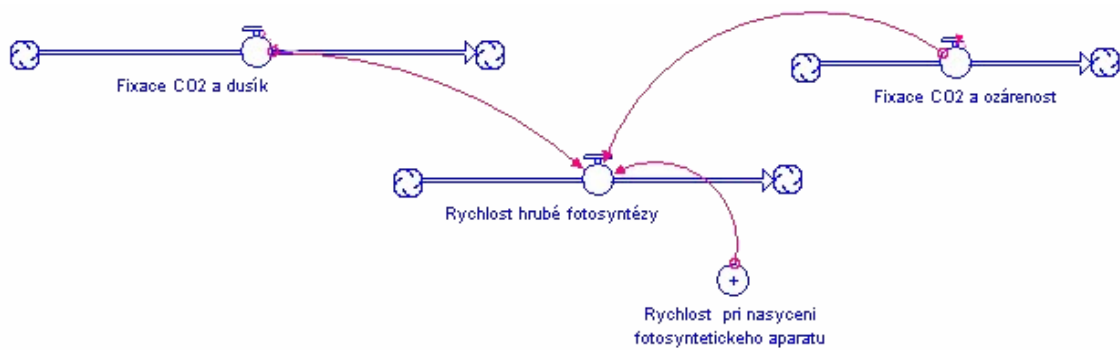
Enzym Rubisco má dvojí aktivitu: (a) Karboxylázovou, kdy katalyzuje reakci ribulosa-1,5-bisfosfát (RuBP) s  $\text{CO}_2$  za vzniku dvou molekul 3-fosfoglycerátu (3PGA) a (b) Oxygenázovou, kdy katalyzuje reakci RuBP s  $\text{O}_2$  za vzniku jedné molekuly 2-fosfoglykolátu (2PG). Karboxylační koeficient charakterizuje karboxylázovou aktivitu Rubisca. Konvertor v tomto případě tedy funguje jako produktivita působení vnějšího zdroje.



Běžná atmosférická koncentrace oxidu uhličitého se pohybuje okolo 386 ppm (neustále se zvyšuje, momentální koncentraci  $\text{CO}_2$  je možno dohledat na internetu). Tato koncentrace však není dostatečná k tomu, aby bylo dosaženo maximální rychlosti fotosyntézy. Mnohé rostliny dosahují nasycení fotosyntézy oxidem uhličitým až při 1000 ppm. Proto je deficit na oxid uhličitý běžným limitujícím faktorem fotosyntézy. Abychom dosáhli zvýšení rychlosti fotosyntézy, musíme okolí rostliny oxidem uhličitým uměle obohatit.



Primární proces, Fixace  $\text{CO}_2$ , je ovlivněn jiným procesem, Ozářeností neboli rychlostí toku fotonů na povrch listu. Dopadající záření však není využito se stoprocentní účinností. Podíl záření zúročného ve fotosyntéze vyjadřuje hodnota kvantového výtěžku. Konvertor v tomto případě zastupuje účinnost působení procesu.



Zabudování oxidu uhličitého do organických sloučenin vyžaduje energii, energii poskytovanou slunečním zářením. Hojnost enzymu jež fixaci  $\text{CO}_2$  zajišťuje je kontrolována dostupností (obsahem) dusíku. Metabolické dráhy fixace oxidu uhličitého tak závisejí na množství energie, které je listem absorbováno.



60 – 80% obsahu dusíku v listech rostliny investují do fotosyntetického aparátu. Přitom významný díl připadá na enzym Rubisco, jež zajišťuje fotosyntetické zabudování oxidu uhličitého do organických sloučenin. Obsah dusíku v listu koreluje s množstvím Rubisca. Vztah mezi množstvím Rubisca a obsahem dusíku v listech je obvykle lineární, s odlišnostmi mezi druhy. Mechanismus, kterým dostupnost dusíku kontroluje hojnost proteinu Rubisco je nicméně z velké části neznámý.

Hypotetický vztah mezi dvěma nebo více proměnnými umožňuje popsat **grafická funkce** (viz vlnovka uvnitř kohoutku). Grafická funkce tak neaspíruje na vysvětlení mechanismu, jak obsah dusíku kontroluje množství proteinu Rubisco, ale umožňuje zachytit experimentálně zjištěný vztah mezi dvěma proměnnými.

## 9.5. Dotazník

### Využití matematických modelů ve výuce fotosyntézy

Vážený studente, studentko,

jmenuji se Renata Cinibulková a jsem studentka učitelského studia biologie a matematiky na PřF UK v Praze. Ráda bych Vás touto cestou požádala o pomoc při vypracování diplomové práce, jejímž cílem je vytvořit matematické modely a výukové materiály, které se vážou k tematice ovlivnění rychlosti fotosyntézy různými faktory. V práci bych zároveň chtěla demonstrovat význam matematického modelování ve vědě i ve výuce.

Aby bylo možné tyto materiály použít ve výuce, potřebuji Vaši zpětnou vazbu, na základě které budou materiály upraveny a dopracovány tak, aby dobře splnily svůj účel.

*Údaje budou použity pouze pro účely výzkumného projektu.*

Děkuji za Váš čas strávený vyplňováním dotazníku.

S pozdravem, Renata Cinibulková

#### Osobní údaje

Název pilotní školy GLOBE:.....

Ročník studia:.....

Oblíbené předměty:.....

Vztah k počítačům (ohodnoťte čísla 1 – 5 jako ve škole):.....

Pohlaví:.....

#### Část A – Hodnocení materiálů podporujících práci s modely

##### 1. Poskytuje úvodní prezentace na téma Základy modelování dostatečný podklad pro Vaší efektivní práci s modely?

- a) ANO, prezentace je zcela postačující.....
- b) Spíše ANO, ale bylo by třeba doplnit o.....
- c) Spíše NE, postrádal/a jsem (uved'te konkrétně).....
- d) NE, prezentace byla zcela nevyhovující, protože.....
- e) NEVÍM, protože.....
- f) Jiná odpověď.....

##### 2. Poskytují pracovní listy dostatek informací pro efektivní práci s modely?

- a) ANO, materiály jsou zcela postačující.....
- b) Spíše NE, materiály jsou příliš stručné, je třeba je doplnit o.....
- c) NE, materiály jsou zcela nevyhovující, protože.....
- d) NEVÍM, protože.....
- e) Jiná odpověď.....

**3. Je teoretická část pracovních listů srozumitelná?**

- a) ANO, teorie je zcela srozumitelná.....
- b) Spíše ANO, teorie je srozumitelná až na některé pasáže a to.....
- c) Spíše NE, teorie je špatně uspořádaná.....
- d) NE, teorie je špatně uspořádaná a klíčové pojmy nejsou dobře vysvětleny (buďte konkrétní).....
- e) NEVÍM, protože.....
- f) Jiná odpověď.....

**4. Ohodnoťte výukové materiály známkou (1 – výborné, 2 – velmi dobré, 3 – dobré, 4 – dostatečné, 5 – nepoužitelné).**

	Poznámka	1	2	3	4	5
A Základy modelování: gramatická pravidla	P					
B Základy modelování: obecné modely	P					
01 Ppm	DP					
02 Vyvětrej si!	M					
03 Cesta do hlubin	DP					
04 CO <sub>2</sub> , ozářenost a rostliny	M					

P...pracovní list k přednášce, DP...doplňující materiál, M...pracovní list pro práci s modely

**5. Vyjádřete se k jednotlivým výukovým materiálům. Co byste změnili nebo vylepšili?**  
A,B Základy modelování ( k přednášce)

.....

.....

.....

.....

01 Ppm (doplňující materiál)

.....

.....

.....

.....

02 Vyvětrej si! (pracovní list pro práci s modelem)

.....

.....

.....

.....

03 Cesta do hlubin (doplňující materiál)

.....  
.....  
.....  
.....

04 CO<sub>2</sub>, ozářenost a rostliny (pracovní list pro práci s modelem)

.....  
.....  
.....  
.....

## Část B – Hodnocení matematických modelů

### 1. Co Vás na práci s modely zaujalo?

.....  
.....  
.....

### 2. Přispěla práce s modely k lepšímu pochopení učiva o fotosyntéze?

- a) Určitě ANO, protože .....
- b) Spíše ANO, částečně.....
- c) Spíše NE, protože.....
- d) Rozhodně NE, protože.....
- e) NEVÍM, protože.....

### 3. Jsou pro Vás modely využitelné ve výuce?

- a) Určitě ANO, protože .....
- b) Spíše ANO, částečně.....
- c) Spíše NE, protože.....
- d) Rozhodně NE, protože.....
- e) NEVÍM, protože.....

### 4. Zaškrtněte, co jste se díky modelu naučili.

- a) Získal/a jsem nové informace o modelování.
- b) Získal/a jsem nové informace o fotosyntéze.
- c) Ujasnil/a jsem si vztahy mezi jednotlivými elementy uvnitř modelovaného systému.
- d) Získal/a jsem lepší představu o fungování modelovaného systému.
- e) Uvědomil/a jsem si význam matematiky v biologii.
- f) Uvědomil/a jsem si úzkou provázanost různých vědních oborů
- g) Jiné

.....  
.....

### 5. Které z následujících možností Vám ztížily práci s modely (zaškrtněte)?

- a) Teorie
  - Nemám dostatek znalostí o modelování.
  - Nemám dostatek znalostí o fotosyntéze.
  - Neznám některé pojmy a definice, které jsou v modelu použity.
  - Nemám jasnou představu o vzájemných vztazích mezi procesy a jevy modelovaného systému.
  - Nemám dostatek informací o práci s matematickými modely.
  - Jiná odpověď.....

b) Software Stella

- Nechápu fungování základních stavebních prvků softwaru Stella (zásobníky, toky a konvertory)
- Nevím, jak mezi sebou vzájemně propojovat stavebních prvky softwaru Stella.
- Mám obtíže při aplikaci gramatických pravidel „jazyku Stella“.

c) Instrukce a úkoly

- Instrukce jsou nejasné a nevím, co mám dělat.
- Instrukce by měly být podrobnější, specifikujte.....
- Úkoly jsou příliš obtížné.

d) Matematika

- Mám obtíže s převody jednotek.
- Mám obtíže se čtením informací z tabulek nebo grafu.
- Mám obtíže při matematizaci reálného problému.

e) Jiné

.....  
.....

**6. Prosím, vyjádřete se k jednotlivým modelům. Co byste změnili nebo vylepšili?**

Vyvětrej si! – simulace

.....  
.....  
.....  
.....

Rychlost fotosyntézy a ozáření – simulace

.....  
.....  
.....  
.....

**7. Které další materiály byste uvítali? (zakroužkujte)**

- a) Powerpointová prezentace pro výklad vlivů jednotlivých faktorů na fotosyntézu.
- b) Powerpointová prezentace pro výklad práce se softwarem Stella.
- c) Další vysvětlující textové materiály
- d) Obrazové materiály
- e) Jiné .....