

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Schopnost lesního porostu poutat oxid uhličitý – spojitost s globální změnou klimatu

Číslo oboru: 8

Název oboru: Ochrana a tvorba životního prostředí

Gymnázium, Brno – Řečkovice
Terezy Novákové 2
621 00 Brno

Milan Pospíšil
SEXTA
2004/2005

Prohlašuji, že jsem seminární práci vypracoval samostatně.

Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v příloženém seznamu.

V Brně dne: 25. února 2005

.....

Na tomto místě bych rád poděkoval pracovníkům Ústavu ekologie krajiny Akademie věd ČR, zvláště pak Prof. RNDr. Ing. Michalu V. Markovi, DrSc., který mě přivedl právě k této práci a k ekologii samotné. Dále Ing. Daliboru Janoušovi, CSc., který mi pomohl řešit některé překážky při realizaci této práce a nakonec RNDr. Kateřině Cibulkové za vstřícný postoj a věcné připomínky.

OBSAH

Úvod.....	3
1. Boj se změnou klimatu – Kyotský protokol	5
2. Globální klimatické změny	9
3. Problematika zkoumání účinků zvýšeného CO ₂ na rostliny.....	15
3.1 Fyziologické účinky CO ₂ na rostliny.....	16
3.2 Současný stav informační databáze.....	22
4. Propady a zdroje uhlíku v terestrickém ekosystému.....	25
5. Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž.....	31
5.1 Klimatická charakteristika.....	32
5.2 Podloží a půdní charakteristika výzkumného smrkového porostu.....	34
5.3 Radiační režim lokality Bílý Kříž.....	35
5.4 Radiační režim porostu.....	36
5.5 Mikroklíma porostu.....	37
5.6 Turbulentní toky CO ₂	37
5.7 Respirace.....	38
5.8 Fotosyntéza.....	39
5.9 Zpracování dat.....	39
6. Toky uhlíku měřené eddy kovarianční metodou.....	40
6.1 Analýza rychlosti a směru větru.....	42
6.2 Stanovení průměrné proudnice.....	43

6.3	Stanovení hlavní stopy (footprint).....	43
6.4	Výběr korektních dat.....	44
6.5	Doplnění chybějících dat (gap filling).....	45
7.	Výsledky.....	48
7.1	Grafy z celého roku 2004.....	48
7.2	Grafy z období od 10.-19.8 2004.....	50
7.3	Plošné grafy čisté ekosystémové výměny.....	51
8.	Metodika výzkumu.....	52
9.	Abstrakt.....	53
10.	Závěr.....	55
11.	Použitá literatura.....	56
12.	Přílohy.....	60

Úvod

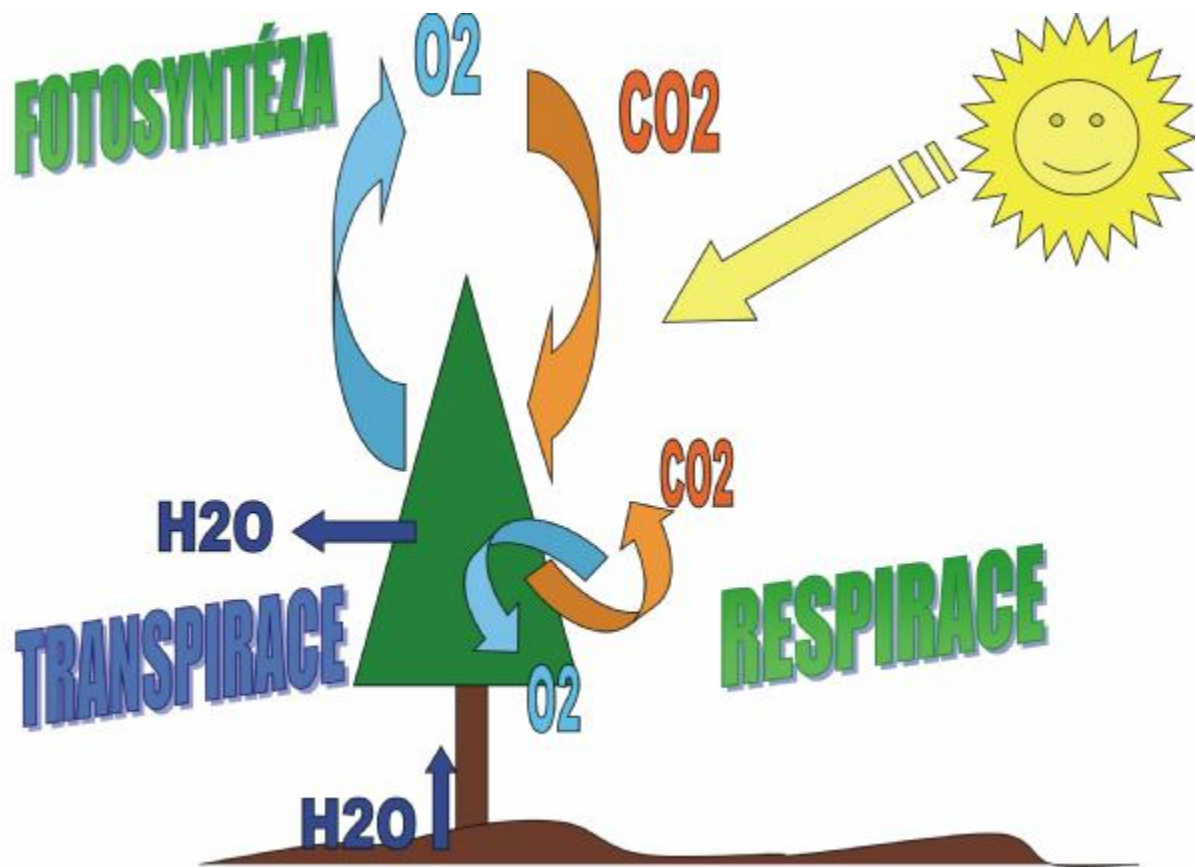
Koloběh uhlíku je zásadní pro zemský systém a je neoddelitelně spjatý s klimatem, koloběhem vody a živin a s fotosyntetickou produkcí biomasy na souši i v oceánech. Správné pochopení globálního koloběhu uhlíku. Je zásadní pro porozumění historie životního prostředí naší planety, její osídlení lidmi a hlavně předpověď a usměrňování společné budoucnosti prostředí i člověka.

Ovlivňování globálního cyklu uhlíku člověkem probíhá již tisíce let. Člověk jej ovlivňuje svojí zemědělskou činností, lesnictvím, průmyslovou a energetickou výrobou a dopravou.

Člověkem je do ovzduší ročně emitováno asi 8 Gt uhlíku. Z tohoto množství je sice 5 Gt přímo absorbováno terestrickými ekosystémy a oceány, přesto však koncentrace CO₂ v ovzduší vzrůstá tempem asi 1,2 ppm (parts per million - hmotnostních dílů v jednom miliónu) za rok. Tento vývoj akceleroval zpětnou vazbou globálního uhlíkového cyklu, která společně s antropogenním navyšováním množství dalších skleníkových plynů bude mít dopad na budoucnost Země. Poslední odhady Mezivládního panelu pro změnu klimatu – IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) poukazují na přibývání množství a závažnosti důkazů globální změny klimatu jako důsledku zesíleného skleníkového efektu atmosféry se souvisejícími dopady na ekosystémy a biodiverzitu.

S velkou pravděpodobností dojde ke globálnímu oteplování. Aktuální modely předpokládaného budoucího vývoje ukazují na pokles současného sinku (spotřebiče) pro uhlík v oteplujícím se klimatu a dokonce se terestrické ekosystémy mohou změnit ve zdroje vzdušného uhlíku. Fotosyntéza, znamenající propady uhlíku, a respirace, znamenající jeho produkci, jsou klíčové procesy, jejichž vzájemná bilance právě určuje chování systému, zda je sinkem či zdrojem uhlíku.(obr.) Oba procesy jsou závislé na teplotě, avšak dopad změny teploty na oba procesy je natolik rozdílný, že u lesních ekosystémů v důsledku zvýšené autotrofní respirace i mineralizace půdy je reálné předpokládat přechod sinku v převládající zdroj uhlíku. Zvýšené teploty mohou navíc zvyšovat ztrátu vody výparem vedoucí ke snížené tvorbě biomasy, tedy snížené asimilaci, která by také mohla výrazně snižovat sílu sinku pro atmosférický uhlík.

Cílem předložené práce je na základě výsledků získaných na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž popsat úroveň uhlíkových zdrojů a sinků horského smrkového porostu a jejich citlivost k faktorům prostředí, a tím přispět k procesovému poznání v systémové ekologii lesa. Uvedené výzkumné pracoviště slouží jako významný bod mezinárodní monitorovací sítě uhlíkového cyklu terestrických ekosystémů. Řízené a observační experimenty uskutečňované na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž hrají zásadní úlohu ve vývoji a testování ekofyziologických a biochemických modelů chování smrkových porostů. Tyto experimenty jsou důležité pro zjištění možných dopadů budoucího prostředí na daný ekosystém a na jeho schopnost dále vázat vzdušný uhlík.



Obr. Schopnosti lesního porostu

1. Boj se změnou klimatu – Kyotský protokol

Jak bojovat proti důsledkům vyšší koncentrace skleníkových plynů v atmosféře? Neexistuje žádný jednoduchý proces a ani nebyl vyvinut žádný postup, který by nás nebezpečných plynů rychle zbavil. A protože ani příroda si s tímto problémem sama neporadí, můžeme jen omezovat nynější produkci skleníkových plynů (o a doufat, že se jejich růst zastaví na přijatelné hladině a způsobí pokud možno co nejmenší škody. Musíme tedy omezovat antropogenní emise a neekologické technologie a postupy nahrazovat šetrnějšími. Navíc proti ekologickým snahám se může postavit a zřejmě i staví průmyslová lobby, jejíž zájmy se celkem pochopitelně mnohdy shodují se zájmy vyspělých států. Boj o budoucnost klimatu je tedy veden i v politických kuloárech.

Hrozbu možných důsledků své činnosti ve změně klimatu lidé rozpoznali teprve až v posledních letech 20. století a začali společně reagovat. Mezinárodní spolupráce vědců a politiků vyvrcholila formulováním v tzv. Kyotský protokol. Jedná se o snahu intervenovat vývoj národních emisí skleníkových plynů. To je velmi citlivý problém úzce související s vývojem národních ekonomik.

V Kyotu čekal průmyslové státy těžký úkol. Měly přesně kvantifikovat snižování emisí skleníkových plynů a také se k němu zavázat. Nejradikálnější návrh, který podporovala rovněž Česká republika, podala Evropská unie, podle které by mělo do roku 2010 dojít ke snížení emisí o celých 15%. Proti se postavily některé státy OECD a země OPEC.

Samotná jednání se konala 1-11. prosince 1997 a nakonec přece jenom došlo k dohodě - byl přijat Kyotský protokol, který určuje každému státu Dodatku I, tj. průmyslovým zemím, o kolik musí do období let 2008-2012 snížit své emise oxidu uhličitého, metanu, oxidu dusného, fluorovaných uhlovodíků a hexafluoridu síry. Tyto plyny mají různou účinnost, proto se budou přepočítávat na ekvivalent CO₂. Souhrnné snížení světových emisí by mělo po splnění Kyotského protokolu činit 5,2%, zadané procentuální omezení pro jednotlivé státy se však liší. (*obr.1*) Radost z dohody však kazí četné hlasy ekologických organizací, které jsou přesvědčeny, že k záchraně naší atmosféry by bylo potřeba daleko razantnějších kroků.

Státy Dodatku I, které mají snížit své emise o	
8%	Belgie, Bulharsko, Česká republika, Dánsko, Estonsko, Evropská unie, Finsko, Francie, Holandsko, Irsko, Itálie, Lichtenštejnsko, Litva, Lotyšsko, Lucembursko, Monako, Německo, Portugalsko, Rakousko, Rumunsko, Řecko, Slovensko, Slovinsko, Španělsko, Švédsko, Švýcarsko, Velká Británie
7%	USA
6%	Japonsko, Kanada, Maďarsko, Polsko
0%	Nový Zéland, Rusko, Ukrajina
-1%	Norsko
-8%	Austrálie
-10%	Island

Obr. 1 : O kolik procent mají jednotlivé státy snížit hodnotu svých emisí

Státy, které mají zápornou hodnotu omezení splní Kyotský protokol i pokud své emise ještě zvednou. Například Austrálie si podle této dohody může dovolit zvýšit produkci skleníkových plynů o celých 8%. Evropská unie včetně ČR musí udělat pravý opak. Můžete si všimnout, že EU je v nejvytíženější skupině zapsána, přestože jsou tam uvedeny i její členské státy. Evropa bude totiž regulovat svoje emise společně. Až pokud by se Evropská unie do zadání nevešla, bude každý stát zodpovídat sám za sebe. To se hodí například Španělům, Portugalům, Řekům a Irům, kteří počítají spíše se zvýšením emisí. Spravovat to bude hlavně Německo, kde se velkých úspor dosáhlo transformací východoněmeckého průmyslu na západoevropskou úroveň. Celkově je nyní Evropa zhruba na úrovni roku 1990 a to ji ještě můžeme směle označit za světlý bod. Jinde emise většinou stabilně stoupají a pokud se bude pokračovat tímto tempem, rozdíl mezi emisemi očekávanými Protokolem a skutečností by dosáhl 30%. Zřejmě to tedy nebude vůbec jednoduché.

Aby měly průmyslové státy boj se skleníkovými plyny co možná nejjednodušší, obsahuje Kyotský protokol tři tzv. flexibilní mechanismy:

1. *Společně zaváděná opatření:*

Jedná se o spolupráci mezi dvěma státy různé hospodářské úrovně, kdy v jednom státě jsou náklady na redukci emisí nižší, ať už z důvodů čistě ekonomických, nebo proto, že v daném státě je větší prostor pro zavádění nových technologií a postupů. Země se totiž mohou procentuálním zastoupením energetických zdrojů, které neemitují skleníkové plyny, a ani uhlíkatá paliva si nejsou rovnocenná - zemní plyn emituje zhruba o 30% oxidu uhličitého méně než uhlí.

Ideálním prostorem pro tuto politiku jsou transformující se země, tedy i Česká republika. Předpokládá se, že ekonomicky zdatnější státy zde budou investovat a pomáhat omezovat emise a za to potom budou dostávat kredity, díky kterým by investující stát mohl splnit vlastní emisní závazky.

2. *Obchodování s emisemi:*

V případě, že nějaký stát nejenže splní limity Kyotského protokolu, ale navíc bude mít stále určitou rezervu, může takto uspořené emise prodat jinému státu, který by tak rovněž dosáhl nebo se přiblížil vlastnímu limitu. Podobný princip fakticky funguje mezi státy EU, které budou již od začátku počítat emise všech členských států dohromady.

3. *Mechanismus čistého rozvoje:*

Státy Dodatku I by měly mít možnost v rozvojových zemích financovat projekty, které by přispívaly ke snížení emisí, čímž by zároveň plnily vlastní závazek.

Emisní cíle Kyotského protokolu se však dají splnit nejen samotným redukováním emisí, ale i rozšiřováním tzv. *propadů*. Ty mají schopnost samy uhlík z atmosféry pohlcovat. V první řadě jde především o lesy, ale i ostatní biomasu, uhlík může být rovněž odčerpáván půdou či oceány. Jednotlivé státy toho mohou využít a odbourávat svůj uhlíkový díl například vysazováním nových lesů či vhodným hospodařením se zemědělskou půdou. Aby však Kyotský protokol vstoupil v platnost, muselo by ho ratifikovat alespoň 55 zemí, včetně tolika států Dodatku I, aby jejich podíl na momentálních emisích činil nejméně 55%. Ke Kyotskému protokolu se zatím připojilo 141 zemí, ratifikovalo jej 65 zemí. Klíčový byl v listopadu 2004 souhlas Ruska, které emituje přes 17 % celosvětové produkce skleníkových plynů. Velký díl viny se také dává Spojeným státům, které mají na svědomí zhruba jednu třetinu světových

emisí, ke Kyotskému protokolu se však odmítly připojit společně s Austrálií. USA kritizovaly Kyotský protokol hlavně za to, že k omezování emisí nutí pouze vyspělé státy. Zasazovaly se, aby se na něm podílely i rozvojové země, hlavně Čína a Indie. Dynamické čínské hospodářství přitom produkuje třikrát více emisí než v roce 1990 a odhaduje se, že do roku 2050 bude pouštět do ovzduší 40 % světových emisí CO₂. Hlavním důvodem pro odstoupení od protokolu byl však spíš ohled na americkou ekonomiku. Na ni by byl podle Bushe vyvíjen nepřijatelný nátlak, což by vedlo ke zdražení cen energie a potažmo k poškození amerického hospodářství.

Kyotský protokol vstoupil v platnost 16. února 2005.

2. Globální klimatické změny a jejich vztah k lesním ekosystémům

Klima Země se neustále mění, což je důsledkem působení různých faktorů, jako je vliv kontinentálních pohybů, variability množství a kvality dopadající sluneční radiace na povrch atmosféry, důsledky sopečné činnosti, účinky dopadů meteoritů a komet, změny hodnot parametrů zemského orbitu, rozrůstání a zmenšování ledovců, změny v cirkulaci a chemismu oceánů, změny ve složení a cirkulaci atmosféry a konečně důsledky změn suchozemské a vodní bioty.

V současnosti je klima Země pravděpodobně ovlivňováno zřetelnými změnami, jež jsou obecně shrnovány pod pojmem „globální klimatické změny“ (dále GKZ). GKZ mohou být definovány jako „dlouhodobé fluktuace teploty, množství srážek, rychlosti větru a ostatních složek atmosféry Země“ (*Krauchi, N. Potential impacts of a climate change on forest ecosystems, s.28*).

Podstatným rysem GKZ je to, že mají antropogenní původ. Jsou důsledkem uvolňování značného množství „skleníkových plynů“. Do skupiny skleníkových plynů je především zařazován oxid uhličitý, jenž je do atmosféry uvolňován pálením fosilních paliv a stále probíhajícím odlesňováním, vodní pára, freony, jenž jsou do atmosféry uvolňovány z chladících zařízení či jiných průmyslových aktivit, metan, který je důsledkem metabolismu stále se zvyšujícího počtu hospodářských zvířat či rozličných způsobů využití krajiny, a oxidy dusíku jež jsou produkty průmyslové činnosti a dopravy. Společným znakem těchto plynů je jejich výrazný účinek na radiační bilanci Země, v důsledku toho, že jsou propustné pro dopadající krátkovlnnou sluneční radiaci, ale jsou naopak nepropustné pro, zemským povrchem odraženou, dlouhovlnnou radiační složku. Tato radiace obvykle uniká do vesmíru tzv. „atmosférickými okny“ (interval vlnových délek 7000 – 13 000 nm). Působení skleníkových plynů spočívá v tom, že právě v těchto „oknech“ nepropustí dlouhovlnnou radiaci zpět do vesmíru a v důsledku toho dochází k postupnému oteplování atmosféry. (*obr.2*)

Podíl jednotlivých typů skleníkových plynů na oteplování je rozdílný. Hlavní účinek (až 72%) má oxid uhličitý, dále pak freony (9,2%) a metan (9,2%), oxid uhelnatý (6,6%) a oxidy dusíku (3%).



Obr. 2: Schéma skleníkového efektu

Důsledky účinků skleníkových plynů na radiační bilanci atmosféry nelze jednoduše spojovat s bezprostředními změnami v klimatu, protože:

- a) v důsledku existence rozsáhlých rezervoárů tepelné energie (oceány) dochází ke zřetelné „lag fázi“ reakce klimatu. To znamená, že změna klimatu může být dlouhou dobu nepozorovatelná a po ukončení „lag fáze“ se může uskutečnit náhlá a zásadní změna klimatu (*Gucinski, J. a kol. Biomass, growth and carbon allocation. In: The likely Impact of Rising CO₂ and Temperature on European Forests, s.128*),
- b) zpětnovazebné mechanismy působící mezi atmosférou, oceány a biosférou mohou výrazně měnit rychlost produkce či odbourávání skleníkových plynů v atmosféře,
- c) komplexní interakce v atmosférické vodní bilanci mohou měnit rychlost tvorby a dobu trvání oblačnosti, což v konečném důsledku ovlivňuje celkové albedo atmosféry,
- d) globální atmosféra je rovněž nahodile ovlivňována náhlými erupcemi vulkanických plynů v důsledku sopečné činnosti.

Stoupající koncentrace CO₂ v atmosféře odráží současný globální cyklus uhlíku, ve kterém je více uhlíku do atmosféry uvolňováno než je absorbováno jeho spotřebiči. Limitace současných možností plného pochopení globálního cyklu uhlíku spočívá ve stanovení hodnověrné bilance uhlíku v systému „atmosféra – biosféra“. To především vyžaduje přesné stanovení nejen kapacit zdrojů, ale i spotřebičů (sinků) atmosférického uhlíku a to jak v měřítku globálním, tak i v měřítku konkrétních oblastí. Místo, které poskytuje úložiště, tj. spotřebovává atmosférický uhlík (CO₂) z ovzduší, nazýváme sinkem.

„To, že GKZ jsou především důsledkem lidské činnosti, dokládá řada literárních údajů, které zachycují nárůst globální koncentrace CO₂ a ostatních skleníkových plynů od poloviny 18. století. V této době činila koncentrace CO₂ v atmosféře 270 – 280 μmol . mol⁻¹, zatímco současná koncentrace CO₂ činí 370 μmol . mol⁻¹ s ročním nárůstem 1,2 μmol . mol⁻¹.“ (Conway, T.J. a kol. *Atmospheric carbon dioxide measurements in the remote global troposphere*, s.81).

„Emise CO₂ do atmosféry stále pokračují, neboť nejsou jen důsledkem spotřeby fosilních paliv, ale odráží se na nich i rozsáhlé odlesňování především v tropických oblastech a změny ve využívání půdy. Přitom globální dynamika této emise a její regulace stále ještě není zcela jasná.“ (Smith, T.M. a kol. *The global terrestrial carbon cycle. Water, Air and Soil Pollution*, s.19)

Globální uhlíkový cyklus je tvořen poměrně malým počtem zdrojů i sinků. Hlavním zdrojem atmosférického uhlíku je spalování fosilních paliv (5,4 Gt C . rok⁻¹) a důsledky změn ve využívání půdy spojené především s odlesňováním (1,6 Gt C . rok⁻¹). Naproti tomu hlavní sinky představují oceány a jejich činnost spojená s ukládáním atmosférického uhlíku (2,0 Gt C . rok⁻¹) a určitá část zůstává v atmosféře (3,2 Gt C . rok⁻¹). Ve výsledné bilanci tedy chybí sink asi pro 1,8 Gt C . rok⁻¹. O této zbylé části, není přesně známo, kam se v globálním měřítku dostává. V literatuře se pro onu blíže neurčenou část depozice globálního uhlíku zaveden termín „chybějící spotřebič – sink“ (Watson R.T.a kol. *Greenhouse gasses and aerosols.In: Climate Change: The IPCC Scientific Assesment*, s.5)

„Suchozemské ekosystémy jsou malým „úložištěm – deponiím“ uhlíku v porovnání s oceány, ale roční toky uhlíku mezi povrchem terestrických ekosystémů a atmosférou jsou srovnatelné s toky mezi oceány a atmosférou.“ (Smith, T.M. a kol. *The global terrestrial carbon cycle. Water, Air and Soil Pollution* 70, s.19)

„Navíc lze konstatovat, že nejméně 20% molekul uhlíku v atmosférickém CO₂ je ročně vyměňováno právě mezi atmosférou a suchozemskými bioty.“ (Farquhar, G. D. a kol. *Vegetation effects on the isotope composition of oxygen in atmospheric CO₂*. *Nature* 363: s.439)

Výsledky pozorování atmosférických koncentrací CO₂ a globálních simulačních modelů ukazují, že jižní hemisféra je slabým sinkem a severní hemisféra je naopak hlavním zdrojem a sinkem pro CO₂. Velikost tohoto sinku se opět s jistou dávkou přiblížení kryje s oním „chybějícím sinkem“, o kterém není přesně známo, kam se tento uhlík v globálním měřítku dostává.

Lesní porosty mají významnou úlohu v globálním cyklu uhlíku v suchozemských ekosystémech. Je to nejen dáno podílem rozlohy lesů na celkové ploše suchozemských ekosystému, které podle současných odhadů činí asi $4,1 \cdot 10^9$ hektarů a množstvím deponovaného uhlíku v lesní vegetaci a půdách, přičemž asi 37% je fixováno v lesích tropického pásma, ale i dlouhověkosti lesních porostů. Dlouhověkost je příčinou toho, že se v lesích na jistou dobu ukládá značná část uhlíku. Mimo depozit ve stromech je nesmírně významný i depozit uhlíku v lesních půdách.

„Síla sinku a tedy i konečná míra depozice uhlíku v lesních ekosystémech je ovlivňována řadou procesů.“ (Smith, T.M. a kol. *The global terrestrial carbon cycle. Water, Air and Soil Pollution* 70, s.20). Tyto procesy zahrnují:

- 1) přímý účinek zvyšující se koncentrace CO₂ na rostliny
- 2) konečnou reakci rostlin k měnícímu se klimatu
- 3) obhospodařování lesů zvyšující depozici uhlíku
 - a) údržba stávajících lesních „sinků“ uhlíku
 - b) expanze lesních ploch a potenciálních „sinků“ uhlíku

Reakce rostlin na měnící se klima, které je důsledkem působení skleníkových plynů, mezi nimiž má právě CO₂ velice významný podíl, lze odhadnout z výsledků rozličných globálních cirkulačních modelů. Tyto modely zvažují možnost potenciálních účinků dvojnásobné koncentrace CO₂ v atmosféře. Je nanejvýš pravděpodobné, že k tomuto nárůstu dojde již v průběhu příštích padesáti let. Hynutí lesů a nárůst množství lesních požárů, které mohou být důsledkem aridnějšího klima, povede k výraznějšímu uvolňování CO₂ do atmosféry, což zesílí skleníkový efekt. Na straně druhé ale bude zřetelný nárůst depozice uhlíku v lesních ekosystémech jako důsledek expanze lesů (např. expanze boreálních lesů do oblastí tundry).

Změny ve využití krajiny, jež mají dopad na globální koloběh uhlíku, jsou především spojeny s rozsáhlým odlesňováním, ke kterému dochází v tropických oblastech. Lze předpokládat, že toto odlesňování bude pokračovat i v budoucnu, což bude významným zdrojem uhlíku uvolňovaného do atmosféry. Tyto nepříznivé tendence mohou být zmírněny lesnickými opatřeními vedoucími k ochraně lesů, či takovými způsoby jejich obhospodařování směřujícími ke zvýšené depozici uhlíku.

„V některých oblastech, jako např. v Brazilské Amazonii, se daří odlesňování snižovat o 20% ročně. Nahrazení hektaru půdy obhospodařovaného metodou toulavého zemědělství stejnou plochou využívanou kombinovaným systémem „pole – les“ (agroforestry) vede k úspoře 5ti a 20ti hektarů odlesněné plochy. Dalším zdrojem úspor emisí uhlíku do atmosféry je péče o lesní půdy. Toho lze dosáhnout několika způsoby“ (*Smith, T.M. a kol. The global terrestrial carbon cycle. Water, Air and Soil Pollution 70, s. 20*):

- 1) zalesňováním za účelem redukce možných ploch náchylných k erozi
- 2) údržba či zlepšení půdní úrodnosti
- 3) koncentrace tropického zemědělství, redukce toulavého zemědělství a zvýšení podílu „agroforestry“ systémů
- 4) převod produkčně méně významných zemědělských ploch na lesní porosty

Dalším způsobem zvýšení depozice uhlíku v lesních ekosystémech je postupné zvětšování rozlohy lesů. Toho lze dosáhnout rozšiřováním ploch městské zeleně, zaváděním „agroforestry“ systémů do zemědělské krajiny, zalesňováním nelesních půd a intenzivní ochranou stávajících lesů. Zvláštní důraz je kladen na jednotlivé způsoby pěstování lesů ve fázi jejich intenzivního růstu, což může zvyšovat sílu růstového sinku lesů, a tak vytvořit dočasné depozity uhlíku.

Téměř 75% v současnosti odlesňovaných ploch jsou vhodné pro zavedení „agroforestry“ systémů. Tento potenciální sink je rovnoměrně rozložen mezi tropické oblasti Asie, Afriky a Jižní Ameriky.

„Matematické modely používané k simulaci ročního koloběhu uhlíku v suchozemských ekosystémech vedou k výsledkům zvýrazňujícím podíl boreálních lesů a lesů mírného pásma v severní hemisféře na ukládání uhlíku.“ (*Tans, P.P. a kol. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. Science 24, s. 1431*). Lesy mírného pásma a boreální lesy zaujímají na severní polokouli plochu $5,03 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ a $7,16 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, jejich vegetace a půda jsou výrazným potenciálním spotřebičem CO₂.

S rostoucím věkem lesního porostu klesá příjem CO₂ a narůstají naopak ztráty uhlíku způsobené opadem a dýcháním. Podíl dýchání s věkem narůstá.

Použití nových metod umožňujících stanovit denní bilanci příjmu a výdeje CO₂ na úrovni porostu přináší důkazy o tom, že především sluneční radiace je hlavním řídicím parametrem vnějšího prostředí určující sílu fixace CO₂ ve světelné části dne, zatímco v noci je uvolňování CO₂ určováno především teplotou vzduchu. Ověření toho, zda skutečně jsou boreální lesy a lesy mírného pásma zdroj či naopak sink CO₂ vyžaduje dlouhodobé řady dat založených na stanovení toku CO₂ do a z porostu.

Z výše uvedeného plyne, že problematika GKZ je skutečně vysoce aktuální. Zároveň je zřejmé, že výzkum reakcí lesních dřevin na působení GKZ má zásadní význam pro pochopení globálního koloběhu uhlíku a možností jeho depozic.

3. Problematika zkoumání účinků zvýšeného CO₂ na rostliny

Vzhledem k tomu, že je CO₂ je základním substrátem fotosyntézy, lze očekávat, že zvýšená koncentrace CO₂ povede ke zvýšení rychlosti jeho fixace fotosyntézou, která se pak projeví ve zvýšeném růstu rostlin a produkci biomasy. Avšak tento poněkud zjednodušený úsudek v sobě nezahrnuje komplexní vazby mezi koncentrací CO₂, fotosyntézou a ostatní parametry vnějšího prostředí či vztahy mezi fotosyntézou, respirací, růstem rostliny a produkcí biomasy.

Informace o reakcích lesních dřevin či jejich porostů na zvyšování atmosférické koncentrace CO₂ mají mimořádnou důležitost vzhledem k tomu, že lesy pokrývají necelou třetinu suchozemských ekosystémů a jsou nositeli asi dvou třetin globální fotosyntetické aktivity. „V globálním klimatickém systému právě lesy ukládají v nadzemní biomase 80 % a v podzemní biomase 40 % uhlíku deponovaného v suchozemských ekosystémech.“ (*Dixon, R.K. a kol. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science 263: s. 185*). Proto výzkumy zaměřené na odhalení vazeb mezi fotosyntetickou aktivitou lesních dřevin (porostů), produkcí/distribucí biomasy a působením zvýšené koncentrace CO₂ jsou významné.

Účinky jakéhokoliv faktoru vnějšího prostředí, tedy i CO₂, na rostliny či ekosystém mohou být zkoumány v prostorovém měřítku a v měřítku časovém. Prostorové měřítko zahrnuje škálu od subbuněčných organel po celé jedince a ekosystémy. Časové měřítko zahrnuje sekundy (rychlé biofyzikální děje) až staletí (migrace lesních ekosystémů).

„S ohledem na aktuálnost možných rozměrů GKZ je většina úvah o důsledcích zvyšování koncentrace CO₂ v atmosféře odvozena od předpokladu, že se v příštích padesáti letech její obsah zdvojnásobí.“ (*Houghton, R. A. a kol. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere. Ecological Monographs 53, s.236*). Zvýšená koncentrace CO₂ ze současných cca 370 μmol . mol⁻¹ na 700 μmol . mol⁻¹ bezprostředně ovlivní karboxylační reakce v prostorovém rozměru chloroplastů a časovém měřítku sekund či minut, zatímco asimilace a transpirace listů je ovlivněna zvýšeným CO₂ v časovém měřítku hodin či týdnů. Růst je zvýšenou koncentrací CO₂ ovlivněn v časovém škále týdnů, měsíců. Konečný důsledek zvýšené koncentrace CO₂ se projeví s časovou prodlevou let či desetiletí.

3.1 Fyziologické účinky CO₂ na rostliny

Hlavní a bezprostřední fyziologická funkce CO₂ vyplývá z toho, že CO₂ je substrátem karboxylační fáze Calvinova cyklu, tj. substrátem enzymaticky katalyzované reakce vazby molekuly CO₂ na druhý uhlík akceptoru, kterým je ribolosa – 1,5 – bisfosfát (RuBP). Tato enzymatická reakce je dvoustupňová. První krok je vlastní vazba molekuly CO₂ na aktivní místo enzymu ribolosa – 1,5 – bisfosfát karboxylázy/oxidázy (RUBISCO), druhým krokem je vazba komplexu RUBISCO-CO₂ na akceptor RuBP. Druhá významná funkce CO₂ tkví v úloze aktivátora enzymatické aktivity RUBISCO. Aktivace se děje prostřednictvím pomalé reakce, při níž dochází k vazbě CO₂ na specifické aktivní místo RUBISCO (proces karbamylace). Komplex „enzym-CO₂“ reaguje s volnými ionty hořčíku a tvoří se konečný aktivní komplex „RUBISCO-CO₂-Mg²⁺“. Aktivní komplex pak váže na třetí aktivní místo molekulu CO₂ v již výše zmíněné karboxylační reakci. (*Edwards, G., Walker, D. C₃, C₄: Mechanisms, and Cellular and Environmental Regulation of Photosynthesis, Science Pub.*)

Již na této ryze vnitrobuněčné organelové úrovni je komplex reakcí Calvinova cyklu, vnitrobuněčného rozvrstvení uhlíku, buněčný transport a odtok asimilátů výrazně ovlivněn poměrem „zdroj – sink“. (*Stitt, M. Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. Plant Cell Environ. 14, s.743*)

„Sekundární funkce CO₂ souvisí s jeho účinky na otevřenost průduchové štěrbin (CO₂ – sensor), čímž je ovlivněn nejen přísun CO₂ do listů, ale i výdej vodní páry listem do okolního prostoru.“ (*Eamus, D., Jarvis, P.G. The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. In: Advances in Ecological Research, s. 10*).

„Vztah mezi rychlostí příjmu CO₂ povrchem listu (A_N) a koncentrací CO₂ má tvar hyperbolické závislosti. Krátkodobá aplikace zvýšené koncentrace CO₂ na neadaptovaný asimilační aparát rostlin vždy způsobuje průkazné navýšení hodnoty A_N , což odpovídá biochemické podstatě asimilace u C₃ – rostlin.“ (*von Cammerer, S., Farquhar, G. D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves, s. 376*)

„Obecně interval zvýšení hodnot A_N při krátkodobé aplikaci zvýšeného CO₂ na neadaptované rostliny kolísá mezi 20 – 300 %. Ačkoliv reakce A_N u rostlin dlouhodobě

adaptovaných na zvýšené CO₂ je velice variabilní, dochází ke stimulačnímu efektu zvýšené koncentrace CO₂ na A_N.“ (Eamus, D., Jarvis, P.G. *The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. In: Advances in Ecological Research, s. 15*).

„Rychlost asimilace klesá s rostoucí délkou působení zvýšené koncentrace CO₂.“ (Raper, P.C., Peedin, G. F. *Photosynthetic rate during steady state growth as influenced by CO₂ concentration, s. 147*)

Stav, při kterém počáteční stimulace A_N pod dlouhodobým vlivem CO₂ klesá a dosáhne i hodnot nižších než je v kontrolní variantě se nazývá „aklimační deprese asimilace“. (Kramer, P. J. *Carbon dioxide concentration, photosynthesis and dry matter production, s. 29*)

Míra tohoto poklesu je různá pro odlišné rostlinné druhy a pohybuje se v intervalu 29-52 % původních hodnot A_N před expozicí ke zvýšenému CO₂. Příčina této redukce není plně známa. V listech rostlin rostoucích pod vlivem zvýšené koncentrace CO₂ byla stanovena průkazně zvýšená akumulace škrobu. Vztah mezi akumulací zásobní formy asimilátů (škrob) a rychlostí fotosyntézy je inverzní, tj. akumulace škrobu je spojena s poklesem rychlosti fotosyntézy. V extrémních případech akumulace škrobu může být příčinou prasknutí chloroplastové slupky. Akumulace škrobu tak ukazuje na stav, kdy fotosyntetická produkce asimilátů v chloroplastech převyšuje jejich transport z chloroplastů a jejich následnou spotřebu. Limitujícím faktorem se pak stává transport asimilátů z chloroplastů. To znamená, že udržení vysokých rychlostí fotosyntézy při zvýšené koncentraci CO₂ je možné jen za předpokladu existence trvale aktivního a silného „sinku“. Není-li takový „sink“ přítomen, pak dochází ke zpětnovazebné limitaci fotosyntetické aktivity a tedy ke snížení rychlosti fotosyntézy.

U mnoha rostlinných druhů byl zaznamenán pokles hodnoty karboxylační efektivity a pokles kapacity asimilace jako důsledek dlouhodobého působení zvýšené koncentrace CO₂. Redukce karboxylační efektivity souvisí s aktivitou enzymu **RUBISCO**. Karboxylační kapacita asimilačního aparátu je úzce spojena s lokální koncentrací dusíku. Takto navozená redukce aktivity a množství **RUBISCO** musí být srovnatelná s produkcí **ATP** a **NADPH** ve fotochemických reakcích fotosyntézy, proto se spouští aktivita enzymových systémů, které jsou spojeny s utilizací asimilátů.

„Mezi další hypotézy, které souvisejí s vysvětlením deprese fotosyntézy pod vlivem dlouhodobě působící koncentrace CO₂ patří i informace o nárůstu množství a aktivity enzymu carbonyl anhydrázy, ukládání fosforu do fosforylovaných cukernatých zbytků či neschopnost Calvinova cyklu regenerovat dostatečně rychle primární akceptor asimilace ribolusa -1,5 - bisfosfátu.“ (von Cammerer, S., Farquhar, G. D. *Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves*, s. 379)

„Formování transportní formy asimilátů, tj. sacharózy, se děje v cytosolu buněk a to kombinací triosa-fosfátu a glukózy. To znamená, že výměna volného fosforu mezi chloroplastem a cytosolem je klíčovým procesem formování transportních forem asimilátů, které jsou dále realokovány v rostlině. Akumulace sacharózy může vést k lokální deficienci volného fosforu v okolí chloroplastů.“ (Anderson, J.W. *Export of light-generated reducing equivalents from illuminated chloroplasts by shuttle mechanism. In: Membranes and Transport*, s. 611)

„Za nejvýznamnější kompenzační efekt atmosférické koncentrace CO₂ je možné považovat zvýšené hodnoty „efektivnosti využití vody“ (WUE). Zvýšenou koncentrací CO₂ navozená snížená vodivost průduchů redukuje rychlost transpirace. Vzhledem k tomu, že zvýšená nabídka CO₂ uvnitř asimilačního pletiva jež je důsledkem nárůstu obsahu CO₂ v okolí, vede ke zvýšené fotosyntéze, je možné pozorovat nárůst hodnoty WUE.“ (Rogers, H.H. a kol. *Response of agronomic and forest species to elevated atmospheric carbon dioxide. Science* 220, s.428-429).

Tímto způsobem pak zvýšená koncentrace CO₂ v atmosféře zmírňuje účinek vodního stresu a to tak, že procentuální nárůst následující po období sucha je vyšší u rostlin pěstovaných ve zvýšeném CO₂ než v kontrole. Tento meliorační efekt zvýšené CO₂ může mít odlišné příčiny. První z nich je zvyšující se koncentrace CO₂ iniciované přivření průduchové štěrbin, které se projevuje vyšší efektivností využití vody. Druhým účinkem je to, že v důsledku zvýšeného nárůstu kořenové biomasy pod vlivem zvýšeného CO₂ rostlina dovede lépe využít vodní zdroje půdy a lépe přežít nepříznivé období sucha. Rostliny adaptované na vyšší CO₂ mají posunuté teplotní optimum fotosyntézy.

„Distribuce uhlíku v rostlině je ovlivněna přísunem CO₂ a je výsledkem rovnováhy mezi příjmem uhlíku a minerálních živin, především dusíku. Stres způsobený nedostatečnou

minerální výživou může úplně eliminovat pozitivní účinek zvýšené koncentrace CO₂. To znamená tedy, že pozitivní efekt zvýšeného CO₂ narůstá s dostatečnou minerální výživou. Výrazného pozitivního efektu zvýšeného CO₂ bylo dosaženo pouze při suboptimální zásobě živin v půdním substrátu či živném médiu.“ (Pettersson, R., McDonald, J. S. *Effects of nitrogen supply on the acclimation of photosynthesis to elevated CO₂*, s.389)

„Stav minerální výživy, a výživy dusíkem zvláště, výrazně ovlivňuje existenci a sílu aklimační deprese fotosyntézy pod vlivem zvýšeného CO₂.“ (Pettersson, R., McDonald, J. S. *Effects of nitrogen supply on the acclimation of photosynthesis to elevated CO₂*, s.389) Deficitní výživa dusíkem výrazně prohlubuje rozsah této deprese. Výrazný vliv dusíku na celkovou reakci asimilace CO₂ je dán především jeho nezastupitelnou rolí v obsahu a aktivitě všech důležitých enzymatických systémů rostliny (karboxylace, přenos elektronů, transport a transformace asimilátů atd.).

Mnohé experimenty ukazují na to, že růstová reakce rostlin na zvýšenou koncentraci CO₂ se projevuje vyšším růstem listů, přičemž tento účinek není spojen se zvýšenou nabídkou asimilátů. Další reakcí je nárůst počtu listů, jejich hmotnosti, nárůst tloušťky listů a hodnoty specifické hmotnosti listu. Zvyšování listové tloušťky, a tedy i specifické listové hmotnosti může být důsledkem jak zvyšujícího se rozměru mezofylových buněk, tak zvýšení množství vrstev těchto buněk. Otázka, zda se jedná o přímý účinek CO₂ na iniciaci meristémových buněk listu, či zda se jedná o efekt zvýšené nabídky asimilátů, zůstává stále otevřena. Rovněž množství a rozměrové parametry průduchů jsou ovlivňovány koncentrací CO₂ během vývoje a růstu listů. (Radoglou, K. M., Jarvis, P. G. *Effects of CO₂ enrichment on four poplar clones*, s.627)

„Značné množství experimentů se zvýšenou koncentrací CO₂ dokládá zvýšení hmotnosti jak kůlových tak jemných kořenů, což vede ke změně poměru „*hmotnost kořen /nadzemní část*“. Alokace asimilátů v rostlině tedy významně závisí na rovnováze mezi rychlostí zásobování uhlíkem a rychlostí zásobování ostatními živinami, zvláště dusíkem, do kořenů. Uvedené výsledky je možné zobecnit i pro podmínky dřevin. Reakce na nedostatečné zásobení živinami vede ke zvýšené alokaci asimilátů a biomasy. Do výstavby mohutného kořenového systému, zatímco reakce na snížený přísun uhlíku vede ke zvýšené alokaci do produkce listoví.“ (Eamus, D., Jarvis, P. G. *The direct effects of increase in the global*

atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. In: Advances in Ecological Research, s. 17).

„Zvýšená koncentrace CO₂ rovněž působí na zvýšenou produkci plodů a nárůst tloušťky kmene. Zvýšený nárůst dimenzí kmene je spojen se zvětšováním šířky jednotlivých letokruhů, ale není spojen se změnami v hustotě dřeva.“ (*Telewski, F.W., Strain, B.R. Densiometric and ring width analysis of 3-year-old Pinus tadea L. and Liquidamber styracifua L. grown under three levels of CO₂ and two water regimes. In: Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree Ring Analysis , s.189).*

„Procesy temnostní fixace CO₂ v kořenech jsou rovněž závislé na koncentraci CO₂, ale množství oxidu uhličitého v půdním prostředí je především určeno intenzitou respirace a přesahuje několikanásobně atmosférickou koncentraci CO₂.“ (*Warrick, R. A. a kol. Assessing the response of food crops to the different effects of increased CO₂ and climatic change. In: The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystem, s. 393)*

Mnohé experimenty ukazují na to, že růstová reakce rostlin na zvýšenou koncentraci CO₂ se projevuje vyšším růstem listů, přičemž tento účinek není spojen se zvýšenou nabídkou asimilátů. Distribuce uhlíku v rostlině je ovlivněna přísunem CO₂ a je výsledkem rovnováhy mezi příjmem uhlíku a minerálních živin, především dusíku. „Nárůst atmosférického obsahu CO₂ rovněž působí na kvalitu a aktivitu půdních mikroorganismů včetně mykorhizních symbiontů dřevin. To je důsledkem zvýšené nabídky asimilátů, jež se projeví ve zvýšené exudaci kořenů. Na uhlovodíky bohaté kořenové exudáty jsou vhodným substrátem pro převážně heterotrofní metabolismus půdních mikroorganismů a mykorhizních hub. Tím je účinek zvýšené koncentrace CO₂ nepřímo spojen s pozitivními změnami na úrovni dostupnosti minerálních živin pro rostliny.“ (*Strain, B. R., Bazzaz, F. Terrestrial plant communities. In: CO₂ and Plants: The response of Plants to Rising Levels of Atmospheric carbon Dioxide, s.177)*

Časové hledisko je dalším významným faktorem ovlivňujícím fyziologické účinky CO₂ na rostliny a dřeviny zvlášť. Časové hledisko účinků na lesní dřeviny lze rozdělit do několika kategorií: 1) Měřítko hodin a dnů

2) Měřítko týdnů a měsíců

3) Měřítko roků, desetiletí a století

Ad 1: Výsledky měření výměny energie, vodní páry, CO₂ a rozličných vzdušných škodlivin uskutečněné v různých typech lesních porostů a s odlišnými druhy dřevin poskytují širokou datovou bázi využitelnou pro testování rozličných matematických modelů zabývajících se reakcí asimilace a s ní spojených procesů na pravděpodobné zvýšení atmosférické koncentrace CO₂. Příkladem takového modelu je model MAESTRO, který je schopen simulace denních chodů fotosyntézy a transpirace včetně průduchových reakcí. „Asimilace korunové vrstvy porostu výrazně narůstá při zdvojnásobení atmosférické koncentrace CO₂ oproti dnešnímu stavu. Ale tento nárůst je menší než by se dalo očekávat při použití neadaptovaných rostlin.“ (*Jarvis, P.G. Atmospheric carbon dioxide and forests. In: Forests, Weather and Climate., s.54*)

Ad 2: „Jednoduchý model umožňující predikci nárůstu biomasy jako lineární funkci porostem přijaté energie sluneční radiace.“ (*Monteith, J.L. Climate and efficiency of crop production in Britain, s. 277*). Udává efektivnost přeměny energie sluneční radiace do tvořící se nadzemní biomasy. „Model požaduje jednoduché vstupy, tj. údaje o sezónním příkonu fotosynteticky aktivní radiace (FAR) a sezónním nárůstu nadzemní biomasy.“ (*Russell, G. a kol. Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: Plant Canopies: their growth form and function, s. 21*).

„Pravděpodobný účinek zvýšené koncentrace CO₂ je možné uvažovat ve více rovinách“ (*Dvořák, V. a kol. Radiation use efficiency of a mature Norway spruce stand. Ekológia 18, v tisku*) :

- a) pozitivní působení na asimilaci, tj. na substrátové úrovni snížení velikosti fotorespirace vzhledem k velikosti asimilace. Výsledkem je následné zvýšení biomasy.
- b) účinek zvýšené koncentrace CO₂ na změny v alokaci asimilátů, tj. výrazný nárůst listové plochy. Konečný důsledek je nárůst biomasy, jež je výsledkem toho, že bude zvýšen záchyt FAR porostem.
- c) všestranně pozitivní účinek CO₂, tj. nárůst listové plochy. Výsledkem je gradace nárůstu biomasy

Model ovšem nemůže v sobě zahrnout ztráty způsobené respirací, transpirací a nedostatkem vody v půdě, což opět limituje jeho užití. Na straně druhé model uspokojivě modeluje sezónní průběh produkce biomasy.

Ad 3: Zrychlený růst porostu lesních dřevin jako možný důsledek působení zvýšené koncentrace CO₂ se projeví v rychlejší zapojení korunové vrstvy porostu. Zároveň by mohlo dojít k rychlejší rotaci porostů na jedné ploše. To je možné ovšem jen za předpokladu, že na úrovni porostů nedojde k depresi fotosyntetické aktivity ke zrychlení půdní mineralizace i zvýšeném obratu živin, a také že nedojde k odčerpání živin. Je rovněž velkou neznámou, zda skutečně dojde k posunu druhové složení porostů. Vliv má cílevědomá pěstební péče na rozšíření areálu a efektivnosti produkce u hospodářských dřevin.

„Výše uvedený přehled problematiky ukazuje na jednu závažnou skutečnost, kterou je nedostatek experimentálních dat získaných v dlouhodobých experimentech na stromech, které jsou součástí lesních ekosystémů. Bez podrobné analýzy těchto experimentů není možné učinit rozumné předpovědi o možných důsledcích GKZ.“ (*Kramer, P. J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis and dry matter production, s.30*)

3.2 Současný stav informační databáze

Množství výsledků o reakcích rostlin na zvýšenou koncentraci CO₂ bylo získáno na mladých jedincích na úrovni listů či letorostů při krátkodobé aplikaci zvýšeného CO₂ v asimilační komoře. Drtivá většina experimentů byla uskutečněna na neadaptovaných rostlinách rostoucích pod vlivem koncentrace CO₂ přirozeného pozadí, tj. 350 μmol mol⁻¹.

Je zřejmé, že z metodických důvodů je problematika dlouhodobého působení zvýšené koncentrace CO₂ na lesní dřeviny značně limitována. „Z technických a ekonomických důvodů je většina publikovaných dat získána v experimentech uskutečňovaných s malými mladými rostlinami, s malým počtem jedinců uzavřených v malých objemech umělé atmosféry.“ (*Eamus, D., Jarvis, P.G. The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. In: Advances in Ecological Research, s.30*). Pro potřeby převodu dat na globální ekologické měřítko je závažným artefaktem ta skutečnost, že mladé stromy prakticky u všech dřevinných druhů jsou výrazně citlivější k působení změn jejich vnějšího prostředí a jejich reakce na tyto změny je často značně odlišná od reakcí dospělých jedinců. Problém je o to závažnější, že při dlouhodobé reakci na zvýšené CO₂ je možné očekávat odezvu, jež bude silnější než se předpokládá,

připustíme-li existenci účinků zvýšeného CO₂ i na morfologii dřevin a ekosystémové procesy. To znamená, že většina doposud publikovaných výsledků založených na krátkodobých expozicích ke zvýšenému CO₂ a uskutečněných s mladými jedinci v malých experimentálních prostorech, může být významně odlišná od reality.

Výhodou experimentů uskutečňovaných v kontrolovaných podmínkách růstových komor či fytotronů je to, že lze dosáhnout velice dobré síly vazby mezi povrchem listů a atmosférou růstového prostoru tzv. „*spražení*“. Síla vazby totiž přímo určuje, které hodnoty vnější atmosféry budou rozhodující při určení energetické bilance listu. Při silné míře „*spražení*“ jsou pro energetickou bilanci povrchu listu rozhodující vlastnosti vzdušné hmoty okolní atmosféry (sytostní deficit, rychlost větru, teplota a vlhkost vzduchu). „Při slabém „*spražení*“ je energetická bilance dána tím, že list je jakoby obklopen malým přiléhajícím prostorem vzduchu, v němž se generuje tepelná energie a bilance je tak určena klasickou energetickou bilancí.“ (Jarvis, P. G., McNaughton, K. G. *Stomatal control of transpiration. Advances in Ecol. Res.*15, s.19)

„Na straně druhé, kultivace rostlin v růstových komorách nebo fytotronech s sebou většinou přináší jiný závažný problém, tj. problém omezeného kořenového prostoru, jenž je zapříčiněn tím, že se používají kultivační nádoby.“ (Thomas, R. B., Strain, B. R. *Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. Plant Physiol.* 96, s. 629)

Omezený růstový prostor kořenů, a tím navozená limitace úrovně minerální výživy vede k porušení rovnováhy mezi nadzemní a podzemní částí rostlin.

Většina raných studií vlivu CO₂ na růst dřevin využívala jedince, kteří nebyli plně aklimatizováni na zvýšenou koncentraci CO₂. stromy byly kultivovány při koncentraci CO₂ odpovídající pozadí a jen na krátkou dobu byly jejich části (listy, letorosty) vystaveny zvýšené koncentraci CO₂. To je opět závažný artefakt, neboť reakce fotosyntézy, transpirace, alokace asimilátů a růstová reakce se mění s délkou působení zvýšené koncentrace CO₂. Proces plné aklimatizace se uskutečňuje v časovém rozmezí hodin až generací v závislosti na tom, jaký proces sledujeme. „Například fotosyntéza průduchové reakce se mohou adaptovat během několika hodin, dní či měsíců; hustota průduchů na povrchu listu se dotváří pod vlivem zvýšeného CO₂ v časové periodě měsíců / vegetační sezóny; genetická

adaptace a přírodní selekce reaguje v průběhu staletí či generací.“ (Woodward, F.I.: *Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from preindustrial levels. Nature 327, s. 617*). Tento problém je zvláště významný u lesních dřevin, které v důsledku své dlouhověkosti rostou v postupně se zvyšující atmosférické koncentraci CO₂. Zdá se, že dlouhodobá reakce na pomalu se zvyšující koncentraci CO₂ se liší od náhlých, byť i dlouhodobě působících aplikací CO₂.

Z uvedených příkladů je možné učinit závěr o tom, že informační hodnota v současnosti je omezená. Nedostatečně zveřejněný protokol chodu experimentu, metodiky aplikace CO₂ a metodiky kultivace a metod měření je příčinou toho, že z velké řady publikovaných prací je možné použít pouze malou část. To je závažný problém, který musí být zvažován při interpretacích dosažených výsledků.

4. Propady a zdroje uhlíku v terestrickém ekosystému

„Terestriální globální cyklus uhlíku tvoří toky CO₂ mezi ekosystémem a atmosférou.“
(Malhi Y. a kol. *The carbon balance on tropical, temperate and boreal forests. Plant, Cell and Environment* 22, s.715)

Tyto toky přímo odrážejí okamžitou bilanci mezi difúzí CO₂ do listů při procesu fotosyntézy a difúzí CO₂ z pletiv a půdy při jeho produkci v důsledku autotrofní a heterotrofní respirace. V této souvislosti hovoříme o čisté ekosystémové výměně uhlíku (**NEE**). V delším časovém měřítku se jedná o bilanci mezi procesy nárůstu množství uhlíku v ekosystému (fotosyntéza, přírůst biomasy, akumulace uhlíku v půdě) a procesy uvolňování uhlíku (autotrofní respirace, mikrobiální dekompozice opadu, oxidace půdního uhlíku, degradace, disturbance), zde hovoříme o čisté produkci ekosystému (**NEP**).

Čistá ekosystémová výměna uhlíku (NEE – net ecosystem exchange) je výslednicí různých fyziologických aktivit uvnitř ekosystému. V zásadě se jedná o příjem sluneční energie autotrofy formou asimilace organických látek a druhou stranou bilance tvoří procesy disimilačního využívání této energie všemi živými organismy. Příjem energie souvisí se zabudováním vzdušného uhlíku, hovoříme o tocích uhlíku do ekosystému, o sinku uhlíku, o propadech uhlíku. Spotřeba energie živými organismy (autotrofními i heterotrofními souvisí s uvolňováním uhlíku, hovoříme o tocích uhlíku z ekosystému, o zdroji uhlíku a o respiračních ztrátách.

Jak bylo uvedeno, NEE je okamžitou bilancí asimilačních a disimilačních procesů. V daný okamžik je určité množství vzdušného uhlíku rostlinou absorbováno a současně je určité množství uhlíku v důsledku autotrofní i heterotrofní respirace uvolněno. Rychlost příjmu uhlíku při asimilačních procesech je možné vyjádřit jako rychlost hrubé asimilace ekosystému **P_E**. Rychlost disimilačních procesů, ale i respirační ztrátu uhlíku v ekosystému vyjadřujeme jako respiraci ekosystému (**R_E**).

Pro lesní porost můžeme **NEE** vyjádřit vztahem (podle Ruimy A. a kol. *CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiatio*, s. 18):

$$NEE = P_E + R_E \quad (1.)$$

Při kvantifikaci toků CO₂ mezi biosférou a atmosférou se tok uhlíku do ekosystému obvykle vyjadřuje zápornou hodnotou, v grafickém znázornění se křivka nalézá pod osou x. Proto ve výše uvedeném vztahu jsou hodnoty P_E záporné. Respirační ztráty porostu mají opačný vektor toku, jsou vyjadřovány kladnými hodnotami. Z hlediska absolutních hodnot jednotlivých toků je tedy NEE vlastně rozdílem P_E a R_E. Hodnoty NEE jsou záporné, převládá-li asimilace nad disimilací, uhlík teče do porostu.

Hrubou asimilaci (P_E) můžeme kvantifikovat jako rozdíl množství uhlíku vyplývajícího z čisté výměny ekosystému (NEE) a množství uhlíku respiračních ztrát ekosystému (R_E).

$$P_E = NEE - R_E \quad (2.)$$

Čistá produkce ekosystému (NEP – net ecosystem production) znamená čistou akumulaci organické hmoty respektive uhlíku v ekosystému za určité časové období. Pro danou časovou periodu to znamená, že množství vyprodukované organické hmoty je poníženo o respirační ztráty celého ekosystému.

Hrubá primární produkce (GPP – gross primary production) je celkové množství organické hmoty respektive uhlíku vyprodukované v procesu fotosyntézy vegetací v ekosystému za určité období.

Vztah mezi NEP a GPP je analogický se vztahem NEE a P_E:

$$NEP = GPP - R_E \quad (3.)$$

Vztah (1.) respektive (3.) pro vyjádření čisté bilance uhlíku v ekosystému považujeme za zásadní, a to především:

1. NEE (NEP) a R_E jsou přímo měřitelné

2. Položky na pravé straně vztahu (1.) respektive (3.) vyjadřují produkci zcela odlišných fyziologických procesů determinovaných rozdílnými faktory prostředí, z nichž P_E (GPP) je podmíněno hlavně ozářeností asimilačního aparátu sluneční radiace a R_E je závislé především na teplotě respirující organické hmoty. (Malhi Y. a kol. *The carbon balance on tropical, temperate and boreal forests. Plant, Cell and Environment*, s.717)

Respirace ekosystému zahrnuje respirační ztrátu všech jeho komponent. Základní dělení je na následující složky:

$$R_E = R_L + R_W + R_R + R_H \quad (4.)$$

R_L = respirace listoví

R_W = respirace dřevní hmoty

R_R = respirace kořenů

R_H = heterotrofní respirace

Pak tedy rozepisujeme vztah (1.) pro NEE jako součet P_E a jednotlivých složek respirace ekosystému podle vztahu (3.) (podle Aubinet M. a kol. *Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology*, s. 160):

$$NEE = P_E + R_L + R_W + R_R + R_H \quad (5.)$$

analogicky

$$NEP = GPP + R_L + R_W + R_R + R_H \quad (6.)$$

Složky respiračních ztrát R_L , R_W a R_R jsou produkty fyziologických procesů týkajících se primárních producentů, souhrnně jsou označovány jako autotrofní respirace (R_A):

$$R_A = R_L + R_W + R_R \quad (7.)$$

Potom z (6.) a (7.) vyplývá, že

$$R_E = R_A + R_H \quad (8.)$$

Pod pojmem heterotrofní respirace (R_H) je zahrnuto všechno ostatní, zejména respirační aktivita půdní organické hmoty a dekompoziční procesy. V rostlinné fyziologii za heterotrofní respiraci pokládána respirace všech heterotrofních, tedy neasimilujících orgánů rostliny.

Produkční aktivitu autotrofního jedince nebo společenstva vyjadřuje čistá primární produkce (**NPP**), tu lze pomocí výše uvedených vztahů vyjádřit následovně:

$$NPP = NEP + R_H \quad (9.)$$

nebo také :

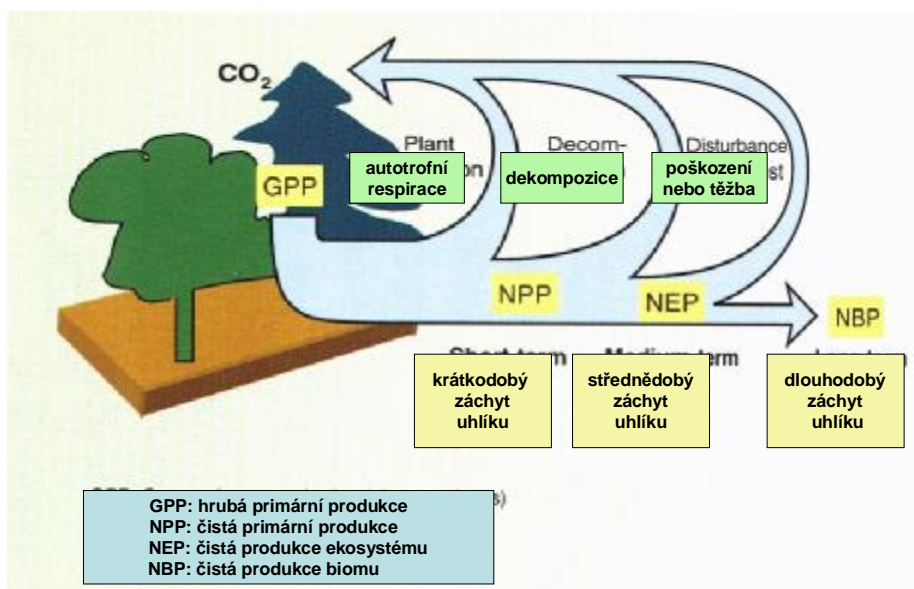
$$NPP = GPP - R_A \quad (10.)$$

Čistá primární produkce (NPP – net primary production) ekosystému vyjadřuje čistý přírůstek biomasy veškeré vegetace v ekosystému, celkové množství vyprodukované organické hmoty je redukováno o respirační ztráty této vegetace (R_A), nikoli však již o heterotrofní respiraci (R_H).

Vedle přirozeného vývoje ekosystému může z dlouhodobého hlediska dojít k dalším ztrátám uhlíku, a to v důsledku přírodních jevů nebo zásahů člověka, proto je vhodné ještě definovat čistou produktivitu biomu (**NBP**).

Čistá produktivita biomu (NBP – net biome production) vyjadřuje schopnost ekosystému dlouhodobě vázat uhlík. Jedná se vlastně o NEP, který je ponížěn o další ztráty uhlíku jako mohou být požáry, poškození porostu sněhem, větrem, suchem, škůdci a také vlivem lidských aktivit.

Fixaci uhlíku lesním ekosystémem ve výše zmíněných kategoriích uhlíkového cyklu ekosystému můžeme popsat následujícím schématem podle *obr. 4.1*:



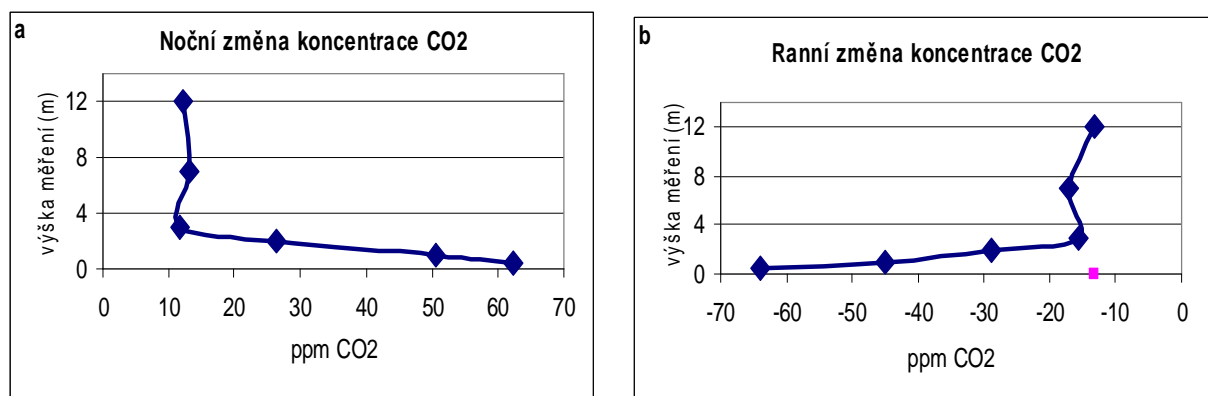
Obr. 4.1: Základní složky uhlíkového cyklu lesního ekosystému (podle Carboeurope)

Tok uhlíku mezi lesním porostem a okolní atmosférou se realizuje třemi způsoby. Nejvýraznější je tok determinovaný turbulencí vzduchu na rozhraní porostu a přízemní vrstvy atmosféry, jedná se o tzv. turbulentní tok uhlíku (F_C), který je měřitelný eddy kovarianční technikou. Změna obsahu uhlíku v atmosféře uvnitř porostu (S_C) a advekční tok uhlíku (V_C) reprezentují méně významné složky toku uhlíku mezi porostem a atmosférou. V podmínkách atmosférické stacionarity a horizontálního homogenního zvrstvení S_C a V_C konvergují k nule a turbulentní tok reprezentuje celou čistou ekosystémovou výměnu uhlíku (NEE). Z hlediska zdrojů a sinků je NEE vyjádřeno vztahy uvedenými výše, podle typů toků CO₂ potom platí vztah (podle Aubinet M. a kol. *Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology*, s. 161):

$$NEE = F_C + S_C + V_C \quad (11.)$$

Změna obsahu uhlíku v ovzduší uvnitř porostu (S_C) znamená především zvyšování koncentrace CO₂ v podmínkách velice slabé turbulence vzduchu v nočních hodinách, kdy CO₂ produkované při respiraci ekosystému je akumulováno v porostní vrstvě. Naopak

snížení koncentrace CO_2 uvnitř porostní vrstvy je pozorováno v ranních hodinách, kdy je CO_2 akumulované během nočních hodin vyváto z porostu nebo absorbováno při rozbíhající se asimilaci ekosystému. S_C dosahuje velice nízkých hodnot během dne a během větrných nocí. Jedná se tedy o oscilace koncentrace CO_2 uvnitř porostu maximálně v 24 h periodě a z hlediska denního průměru je tato složka toku nulová. Tuto složku toku uhlíku lze stanovit měření změn koncentrace CO_2 v několika úrovních výškového profilu porostu. (obr. 4.2)



Obr. 4.2: Změna obsahu CO_2 v ovzduší ve výškovém profilu smrkového porostu na EEP Bílý Kříž v Moravskoslezských Beskydách v průběhu střídání dne a noci

- kumulace CO_2 v nočních hodinách mezi dny 27.7. 2004 v 17:00 a 28.7. 2004 v 05:00
- úbytek CO_2 v ranních hodinách mezi 05:00 a 07:00 dne 28.7. 2004

Tok CO_2 vlivem advekčního proudění může být v podmínkách bezvětrných nocí významnější než turbulentní transport CO_2 , avšak dostupnými technologiemi je v podmínkách lesního porostu prakticky nezměřitelný. V podmínkách horského terénu, což je pro případ Experimentálního ekologického pracoviště (EEP) Bílý Kříž, je v nočních hodinách akvekční proudění způsobeno stékáním chladného vzduchu po svahu z chladnoucího povrchu půdy, a to bez ohledu na směr mírného proudění vzduchu nad lesním porostem. K tomuto jevu katabatického proudění dochází za podmínek výrazného vyzařování zemského povrchu, tedy za jasných nocí.

Za určitých podmínek může docházet i k advekčnímu proudění, kdy studený vzduch naopak stoupá nahoru po svahu. K tomuto jevu dochází vlivem velkého hromadění studeného vzduchu v údolí a jeho rozpínání a vytlačování ze sevřeného údolí. Na EEP Bílý Kříž nebyl tento typ advekčního proudění zaznamenán.

5. Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž

Tato práce vychází z výsledků převážně získaných při observačních experimentech uskutečňovaných na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž. Cílem experimentů bylo popsat biofyzikální úroveň uhlíkových zdrojů a sinků horského smrkového porostu a jejich citlivost k faktorům prostředí.

Experimentální ekologické pracoviště (EEP) Bílý Kříž se nachází v oblasti Moravskoslezských Beskyd. Tato karpatská oblast se vyznačuje převážným výskytem stanovišť jedlových bučin (74%). Oblast je charakteristická vysokou lesnatostí (75%) a dřevinnou skladbou významně pozměněnou ve prospěch smrku. Lesy byly dlouhodobě zatěžovány imisemi. Po prudkém teplotním zvratu 1978/1979 došlo k těžkému poškození rozsáhlých porostů na více než 2500 ha. Od druhé poloviny 80. let se zdravotní stav porostů již nezhoršuje a dochází k postupnému zlepšování. Díky vysokým srážkám jsou i chudá stanoviště velmi produktivní. Přírodní podmínky tedy způsobují, že i průměrné zásoby dosahují vysokých hodnot – 317 m³.ha⁻¹. Netěžením celkového průměrného přírůstku, neboť skutečná těžba je významně nižší, dochází k nezadržitelnému nárůstu zásob (1990 – 17 129 tis. m³, 2000 – 19 538 tis. m³).

EEP Bílý Kříž bylo založeno v roce 1986 v rámci projektu „Komplexní výzkum vlivu imisí na lesní hospodářství Beskyd“, a to původně jako klimatologická stanice umístěná v lesním prostředí. Z původní klimatologické stanice tak bylo postupně vybudováno rozsáhlé ekologické pracoviště řešící celou řadu problémů životního prostředí zejména metodami ekologické fyziologie. Od prvotního studia vlivu imisí na beskydské lesy se vědecké úsilí na počátku 90. let minulého století přesměrovalo na výzkum vlivu očekávané klimatické změny, zahrnující především vliv zvýšené koncentrace CO₂ a zvýšeného vlivu UV-B radiace na porosty smrku ztepilého, v menší míře i buku lesního, a na travinné porosty horských lučních ekosystémů.

V současnosti je EEP Bílý Kříž významným bodem mezinárodní monitorovací sítě uhlíkového cyklu terestriálních ekosystémů (CARBOEUROFLUX). Na pracovišti jsou mimo jiné řešeny projekty programu CARBOEUROPE a národní projekt CZECHCARBO, pracoviště získalo statut výzkumné infrastruktury EU pro výzkum dopadů klimatické změny na evropské lesy (projekt MERCI).

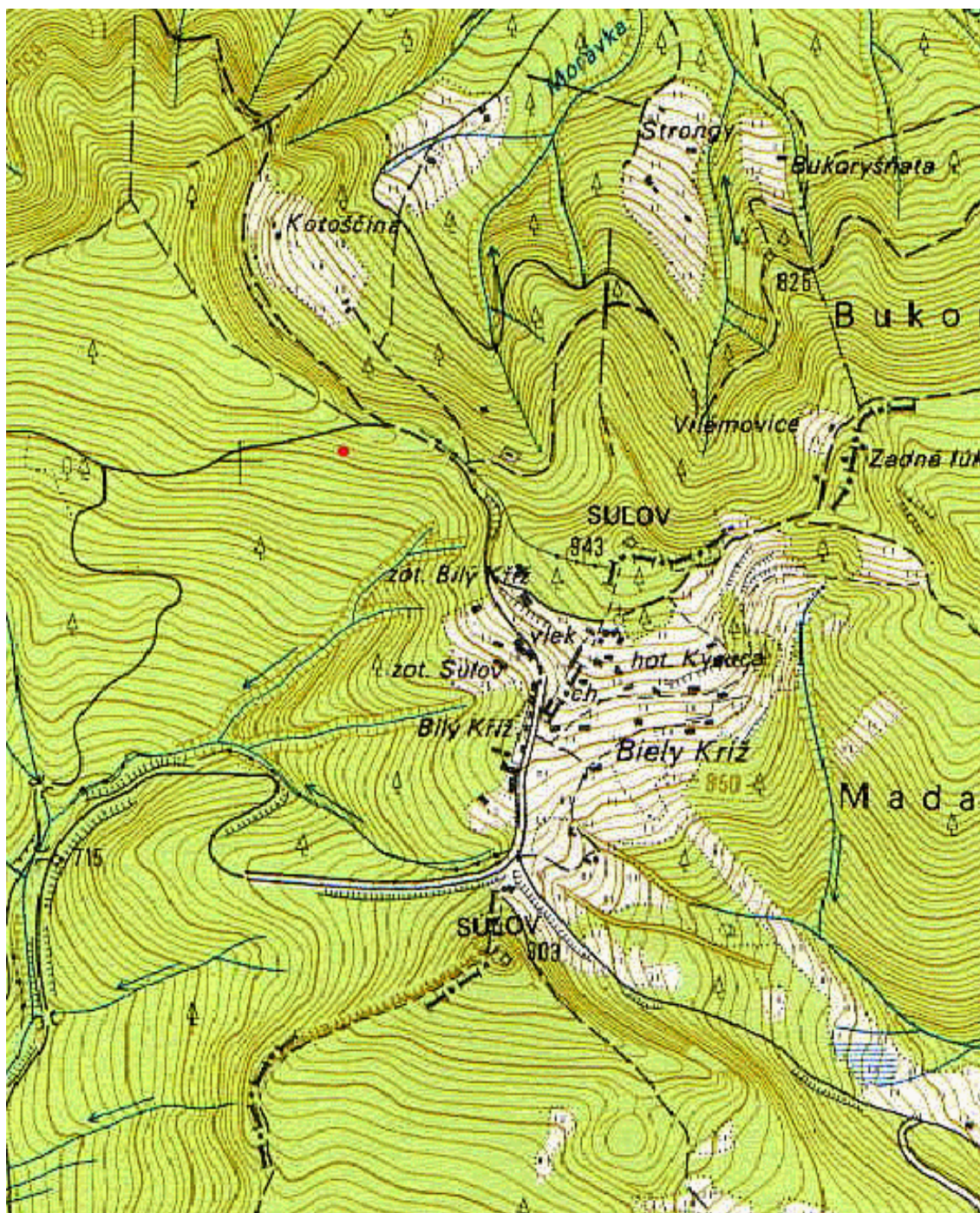


Obr. 5.1: Celkový pohled na Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž z výzkumnými plochami smrkového porostu, experimentálními zařízeními a laboratořemi.

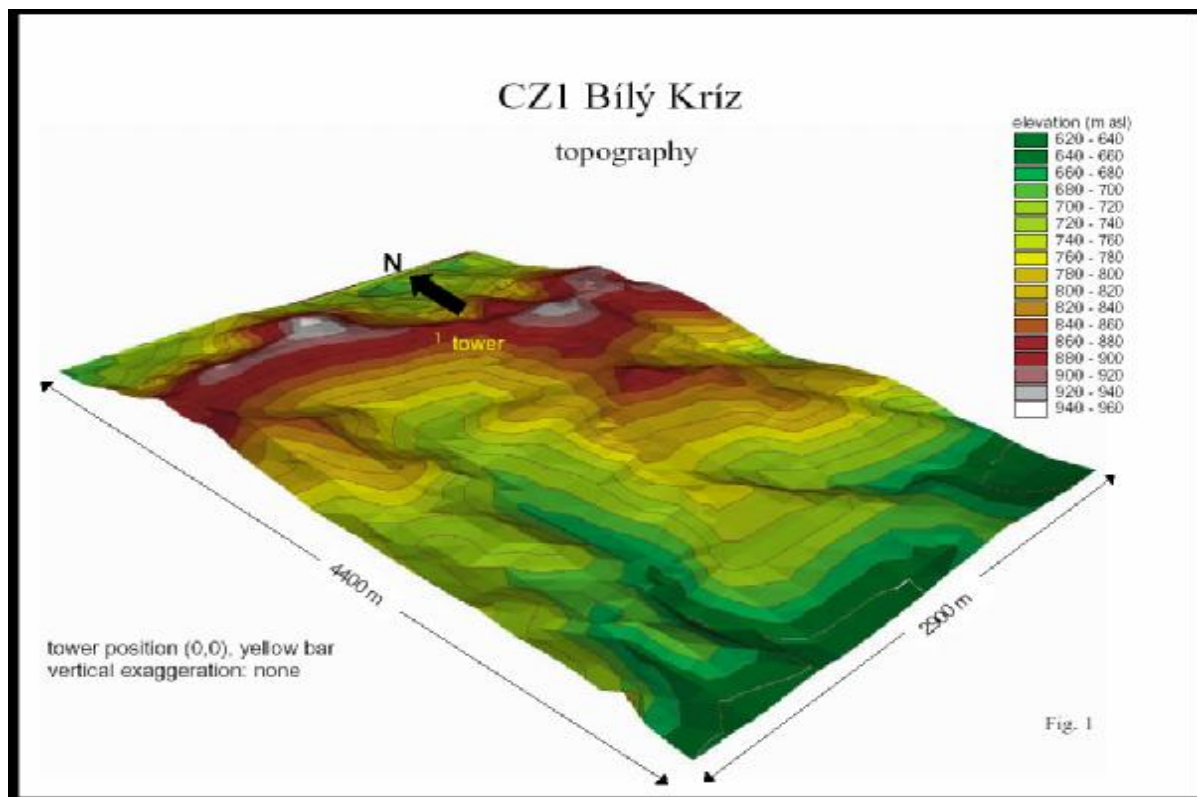
EEP Bílý Kříž (*obr. 5.1*) se skládá z polních laboratoří, porostů smrku ztepilého (*Picea abies* [L.] Karst.) využívaného pro observační experimenty, smrkového porostu určeného pro řízené experimenty v experimentálních zařízeních a experimentálních zařízení pro studium účinků zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ a pro studium dopadů zvýšené UV-B radiace, meteorologické stanice a stanice měření čistoty ovzduší Českého hydrometeorologického ústavu.

5.1 Klimatická charakteristika

Poloha EEP je určena zeměpisnými souřadnicemi 39°30'17'' s.z.š. a 18°32'28'' v.z.d. (*obr. 5.2*). Nadmořská výška vlastního stacionáru je 892 m.n.m. (*obr. 5.3*), výzkumný smrkový porost se nalézá ve výšce 800 až 900 m.n.m. na jižním svahu sklonu od 12° do 16°. Lokalita je charakterizována průměrnou roční teplotou 5,5 °C, ročním úhrnem srážek 1300 mm, průměrným počtem dnů se srážkami nad 1 mm 140 – 160 a průměrnou relativní vzdušnou vlhkostí 80%. Délka vegetační sezóny je 120 – 140 dnů. Sněhová pokrývka setrvává přes zimní období 120 – 140 dnů. Z hlediska znečištění ovzduší leží lokalita Bílý Kříž v oblasti s mírným imisním zatížením (databáze Českého hydrometeorologického ústavu).



Obr. 5.2: Mapa oblasti Bílého Kříže, měřítko 1:10 000, červená tečka označuje věž eddy kovariančního měření ve smrkovém porostu Experimentálního ekologického pracoviště Bílý Kříž.



Obr. 5.3: Topografie lokality Experimentálního ekologického pracoviště Bílý Kríž. N označuje severní orientaci a tower označuje umístění eddy koivariančního měření ve smrkovém porostu (archiv evropského projektu CARBOEUROFLUX)

5.2 Podloží a půdní charakteristika výzkumného smrkového porostu

Geologické podloží porostu je tvořeno flyšovými vrstvami s převahou sedimentů pískovce. Půdní typ je klasifikován jako humusoželezitý podzol s podílem jílovitých částic od 15 do 38 %, textura půdy je písčitohlinitá až hlinitopísčítá s 30 – 40 % skeletu. Hloubka půdního profilu je 60 – 90 cm.

Popis půdních profilů:

- 0 – 1(2) cm opad jehličí a trav , mezi stromy mocnější vrstva opadu, místy borůvkový drn a mechy, v mezerách opad málo mocný, částečně rozložený
- 1 – 8 cm černá plstnatá měl s příměsí drti na povrchu, hustě prokořeněná, čerstvě až mírně vlhká, odlupující se v plástech, místy patrné zbytky dolomitického vápence
- 8 – 20 cm ve svrchní části málo mocná přechodová vrstva, vespodu vybělená , světle šedá písčitohlinitá zemina, s příměsí skeletu, slabě prokořeněná,
- 20 – 35 cm tmavě hnědá, písčitohlinitá, čerstvě vlhká, s příměsí skeletu do 10 %
- 35 – 55 cm rezivě hnědá, písčitohlinitá, čerstvě vlhká, s příměsí štěrku do 15 %, se zbytky částečně rozložených kořenů
- 55 – 80 cm přechodná vrstva do substrátového horizontu, okrově šedá, písčitohlinitá, čerstvě vlhká, skelet o velikosti do 10 – 20 cm

Depozice dusíku je $25 - 30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, na volné ploše $11,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a pod korunovou vrstvou $12 - 30 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Smrkový porost byl v letech 1989, 1985 a 1987 letecky hnojen mletým dolomitickým vápencem vždy v dávce $3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Obsah oxidovatelného organicky vázaného uhlíku v půdě (*tab.5.1*) byl stanoven spektrofotometricky po oxidaci chrómsírovou směsí.

Mocnost (cm)	0 - 1	1 - 6	6 - 8	8 -14	14 - 30	30 - 38	38 - 50	50 - 90
% C	46,8	45,3	30,8	6,24	1,54	3,87	2,91	2,54

Tab. 5.1:Obsah uhlíku v jednotlivých půdních vrstvách

5.3 Radiační režim lokality Bílý Kříž

Energie dopadající globální radiace je měřena pyranometrem Kipp-Zonen CM6 (fa Delft, Nizozemí), difúzní složka globální radiace je měřena pyranometrem Kipp-Zonen

CM5 (fa Delft, Nizozemí) opatřeným stínítkem. Hustota toku dopadajícího fotosynteticky aktivní radiace (PPFD) je měřena kvantovým čidlem LI-190S (fa LI-COR, USA), měření difúzní složky fotosynteticky aktivní radiace (FAR) je opět realizováno pomocí stínítka (obr. 5.4). Hodnoty jsou ukládány automatickými měřicími ústřednami (Delta-T, Velká Británie).



Obr. 5.4: Sestava čidel pro měření radiačního režimu lokality Bílý Kříž

5.4 Radiační režim porostu

Hustota toku FAR (PPFD) dopadající na korunovou vrstvu porostu je měřena jedním kvantovým čidlem, PPFD odražená korunovou vrstvou porostu je měřena 5 kvantovými čidly a PPFD pronikající pod korunovou vrstvou je měřena ve dvou úrovních vždy 25 kvantovými čidly (obr.5.5). Základem kvantových čidel použitých v porostu jsou fotodiody BPW 21 (fa Siemens, SRN). Radiační bilance smrkového porostu je měřena bilancoměrem Kipp-Zonen CNR1 (fa Delft, Nizozemí). Hodnoty jsou ukládány automatickými měřicími ústřednami (Delta-T, Velká Británie).



Obr. 5.5: Sestava čidel pro měření FAR pronikající pod korunovou vrstvou smrkového porostu Na EEP Bílý Kříž.

5.5 Mikroklima porostu

V průběhu vegetační sezóny jsou na meteorologické věži (*obr.5.6*) umístěna v několika výškách čidla profilového měření relativní vlhkosti vzduchu (6 ks RHA1 kapacitní čidlo (Delta-T, Velká Británie) ve výškách 2, 6, 7, 8, 10, 15 m), teploty vzduchu (6 ks RHA1 hermeticky uzavřené termistory (Delta-T, Velká Británie) ve stejných výškách jako předchozí čidla) a rychlosti větru (6 ks AN1 (Delta-T, Velká Británie) ve výškách 6, 7, 8, 10, 13, 15 m). V blízkosti věží jsou umístěna čidla zaznamenávající teplotu půdy v hloubkách 5, 10, 20, 30 a 50 cm (PT1000 (HIT Uherské Hradiště)). Srážky jsou měřeny automatickým srážkoměrem (Amet, ČR). Hodnoty jsou ukládány automatickými měřicími ústřednami (Delta-T, Velká Británie).

Obr. 5.6: Meteorologický stožár



5.6 Turbulentní toky CO₂

Turbulentní toky CO₂ mezi porostem a přízemní vrstvou atmosféry jsou měřeny eddy kovariančním systémem In Situ Flux (In Situ Flux, Švédsko) pro měření lokálních povrchových toků pohybové energie, zjevného tepla, vodní páry a oxidu uhličitého umístěného nad smrkovým porostem ve výšce 13 m. (*obr.5.7*) Systém se skládá ze dvou hlavních součástí – trojosého ultrasonického anemometru umístěného ve výšce 12 m nad zemí a infračerveného analyzátoru plynů. Ultrasonický anemometr měří ve frekvenci 21 Hz všechny tři složky rychlosti větru a rychlost zvuku (pro výpočet virtuální teploty vzduchu). Infračervený analyzátor plynů stanovuje okamžité vzdušné koncentrace CO₂ a H₂O. Signály z obou přístrojů sjednocuje software, který v reálném čase počítá okamžité toky látek a energií a vnáší do naměřených dat potřebné korekce.



Obr. 5.7: Eddy kovarianční systém umístěný nad smrkovým porostem na EEP Bílý Kříž

5.7 Respirace

Měření toku CO_2 z půdy a biomasy kmenů je realizováno pomocí automatického systému SAMTOC (obr.5.8). Systém SAMTOC sestává z 8 půdních komor s mechanikou zavírání a 8 kmenových komor s pneumatickým zavíráním, dále obsahuje přepínací ventily, pumpu, analyzátor koncentrace CO_2 (WMA-3, PP Systems, Velká Británie), osobní počítač s řídicím programem, půdní teploměry (PT-100, HIT, Česká republika). Měření se provádí cyklicky v intervalech 80 minut. Měření dalších složek porostu (kmen, list) jsou



uskutečňována pomocí přenosných gazometrických systémů řady LI COR (LI COR, USA).

Obr. 5.8: Automatický systém na měření respirace půdy a kmenů smrkového porostu na EEP Bílý Kříž

5.8 Fotosyntéza

Fotosyntetická charakteristika smrku ztepilého je sledována s použitím gazometrických metod. (obr.5.9) Závislost rychlosti čisté fotosyntézy (P_N) na dopadající FAR, tj. relace $P_N - PPF$ je stanovena s využitím přenosného otevřeného systému CIRAS-1 (PP Systems, Velká Británie). Nově je používána asimilační komora opatřená Peltierovými můstkami pro udržování konstantní teploty listu v průběhu měření. Komora je dále vybavena řízeným zdrojem studeného světla tvořeného LED diodami. Rozsah intenzit tohoto světelného zdroje je od 0 do $3\,000\ \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 5.9: Asimilační komora na měření rychlosti fotosyntézy

5.9 Zpracování dat

Ke zpracování dat je využíván program Microsoft Excel a pro podrobnější statické zpracování dat program Statistica.

6. Toky uhlíku měřené eddy kovarianční metodou

„Ztrátu nebo akumulaci uhlíku v terestrickém ekosystému lze stanovit nebo přímo měřit řadou metod. Zásadní pro volbu postupu je prostorové i časové měřítko. Ke stanovení zásob uhlíku v lesním ekosystému je možné použít tradičních lesnických inventarizačních metod rozšířených o zjišťování zásoby uhlíku v půdě.“ (*Watson R.T. a kol. Land use, land-use change, and forestry. A special report of the IPCC*). Aby se stanovení zásoby uhlíku v půdě stalo součástí běžných lesnických inventarizací, je ale obtížně realizovatelné. Přesto však obrovskou výhodou inventarizací je, že mohou být použity na velice rozsáhlých územích. „V současné době je proto možné sledovat řadu mezinárodních snah o sjednocení inventarizačních postupů, aby do národních uhlíkových bilancí vedle emisí uhlíku mohly být započítávány i uhlíkové propady.“ (*Cannel a kol. National inventories of terrestrial carbon sources and sinks, s.505*). Na Experimentálním ekologickém pracovišti (EEP) Bílý Kříž je v této souvislosti řešen projekt COST.

Pro kalibraci a verifikaci stanovení toků uhlíku z leteckých měření, dálkového průzkumu, případně i atmosférických transportních modelů, slouží měření toků uskutečňovaná na lokální úrovni. K těmto patří gazometrická měření za použití asimilačních a respiračních komor i měření gradientů koncentrací CO₂. Nejrozšířenějším způsobem stanovení přímých toků energie a látek (CO₂) mezi porosty a atmosférou je však eddy kovarianční metoda. Její využití v dlouhodobých výzkumech toků uhlíku mezi ekosystémy a atmosférou umožnilo až v devadesátých letech minulého století komerčně dostupné infračervené spektrometry použitelné v terénních podmínkách.

„Metoda eddy kovariance je založena na měření projevů vzdušných vírů.“ (*Aubinet M. a kol. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology, s. 113*). Principem je, že vertikální tok jakékoliv skalární veličiny v ovzduší (např. obsahu CO₂ nebo H₂O) je součtem průměrného vertikálního toku a jeho fluktuací tzv. Reynoldsova dekompozice, kde průměr vertikálních fluktuací proudění musí být nulový. V podstatě se jedná o souběžné měření rychlosti a směru jednotlivých vírů vzduchu a s nimi spojených okamžitých koncentrací CO₂ a vodní páry. Výsledný tok je pak počítán jako průměrná hodnota kovariance mezi fluktuacemi ve vertikální složce rychlosti vzduchu a koncentracemi CO₂ nebo vodní páry.

Eddy kovarianční metoda umožňuje dlouhodobá měření turbulentních toků energie a látek mezi porostem a přízemní vrstvou atmosféry, poskytuje kontinuální a okamžité informace o vztazích ekosystémů a jejich prostředí, o jejich reakci na narušení prostředí a také kvantifikují faktory, které způsobují variabilitu ročních toků. Jedná se o nejmodernější přístup aplikovatelný na celé porosty lesních dřevin, umožňuje vyhodnotit data z více zdrojů a velice přesně v denních chodech sledovat výměnu pohybové energie, zjevného a latentního tepla, vodní páry a oxidu uhličitého mezi porostem a přízemní vrstvou atmosféry. Umožňuje stanovit primární produkci lesního porostu, efektivitu konverze CO₂ do biomasy, efektivitu využití vody při tvorbě biomasy a spolu se znalostí fotosynteticky aktivní radiace do porostu také efektivitu využití sluneční radiace pro tvorbu biomasy. Jedná se tedy o přímé propojení fyzikálních výzkumů v podmínkách reálného lesního porostu s produkční ekologií lesa.

I přes masivní využívání eddy kovarianční techniky má tato metoda i své nedostatky. Výběr dat, která je možno označit za korektní, vychází z principů měření a z analýzy okolního terénu. „Vyloučena musí být data, která byla získána při chybném fungování přístroje (chyby kalibrace či nastavení časového zpoždění, nefunkčnost jednotlivých součástí), při stabilním zvrstvení atmosféry a měření ze směru, ve kterých terén nevytváří vhodné podmínky pro měření nebo ve kterém stopa májí zájmový porost.“ (*Aubinet M. a kol. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology, s. 113*).

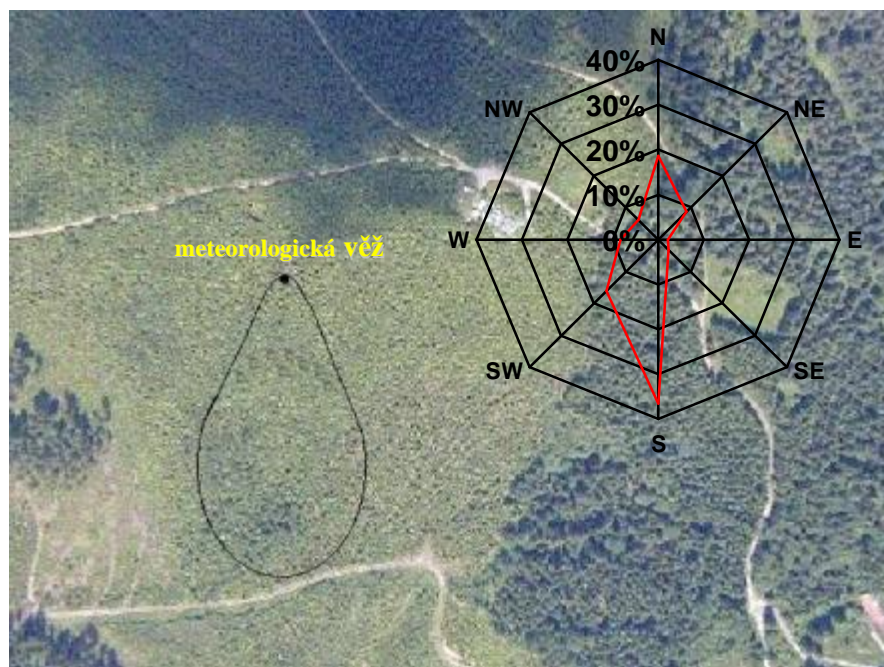
Protože je fungování metody založeno na turbulenci proudícího vzduchu, souvisí hlavní problémy s nedostatečně vyvinutou turbulencí. K tomu dochází při stabilním zvrstvení atmosféry, tedy zvláště v noci. Za těchto podmínek se CO₂ akumuluje v nižších vrstvách, než je umístění eddy kovariančního přístroje, zejména pod korunami stromů. K jeho vymývání potom může docházet advekcí, a měření jsou tudíž zatížena významnou chybou.

Terénní překážky a nehomogenní či nerovný povrch mohou působit vznik vnitřních mezních vrstev, ve kterých je měření nepřesné. Svažité terén může způsobovat konvergenci a divergenci proudnic, které mají za následek zrychlování a zpomalování proudění vzduchu a také jeho nenulovou vertikální rychlost. „Ve svažitém terénu dále může docházet ke stékání studeného vzduchu po svahu dolů (katabatické proudění). Mimo dosah eddy kovarianční měření, a tudíž k podhodnocení měřených toků.“ (*Aubinet M. a kol. Comparing CO₂ storage and advection conditions at night at different CARBOEUROFLUX sites*)

Pečlivé analýza korektnosti dat je uskutečňována právě v podmínkách horského smrkového porostu na EEP Bílý Kříž.

6.1 Analýza rychlosti a směru větru

Prvním krokem správného umístění eddy kovariančního přístroje a správné interpretace naměřených dat je analýza rychlosti a směru proudění vzduchu v dané lokalitě. Lokalita Bílý Kříž je typická převažujícím jižním prouděním, po něm následuje severní proudění (obr. 6.1). Větr o rychlosti vyšší než 4 m.s^{-1} přichází téměř výhradně z jižního směru. To je výhodné pro jednoznačné definování hlavní stopy (footprint). Nejčastěji se zde vyskytuje vítr do 2 m.s^{-1} (57,3%). Tato charakteristika lokality Bílý Kříž je pro aplikaci eddy kovariančních technik méně výhodná. Při nižších rychlostech větru je turbulence nedostatečně vyvinutá, přibývá tudíž nekorektních dat, která je nutno vyloučit.



Obr. 6.1: Výzkumný smrkový porost na EEP Bílý Kříž s vyznačením hlavní stopy eddy kovariančního měření a větrná růžice (větrná růžice podle Havránková K. a kol. Air flow over a young spruce forest: I. Wind direction analysis and mean vertical wind speed profiles. Zpravodaj Beskydy 1, s.77)

Charakteristické proudění vzduchu na lokalitě Bílý Kříž je dána morfologií terénu, kde dominujícím je severojižně orientované údolí. „Převládající západní proudění této oblasti Beskyd (podle měření vrcholové stanice Lysá hora) je do údolí stáčeno do směrů sever či jih, ale současně je významně zpomalováno.“ (*Hurtalová T. a kol. Deformation of air flow over a young spruce forest stand., s.237*)

6.2 Stanovení průměrné proudnice

Výzkumný smrkový porost na lokalitě Bílý Kříž se nalézá ve svahu. Pro stanovení použitelnosti eddy kovariančních technik je nutné vyloučit nenulovou vertikální složku vektoru proudění vzduchu, v případě svažitého terénu vztaženou k rovině stopy. Nulový průměr vertikálních fluktuací proudění je totiž principem eddy kovarianční metody. Z analýzy odchylky vektoru rychlosti od horizontálního směru pro různé třídy rychlosti větru odděleně a pro různý parametr stability atmosféry vyplývá, že vektor rychlosti větru se od roviny svahu ve všech směrech podstatnou měrou neodchyluje, ze severní i jižní strany proudí ve sklonu svahu 11 až 16 stupňů. „Lze konstatovat, že vektor rychlosti větru kopíruje svah, což je pro uplatnění eddy kovarianční metody zásadní.“ (*Havránková K., Janouš D. Analysis of the air flow above the mountain spruce stand in the locality Bílý Kříž in Moravian-Silesian Beskyds during the vegetation season 1999, s. 71.*)

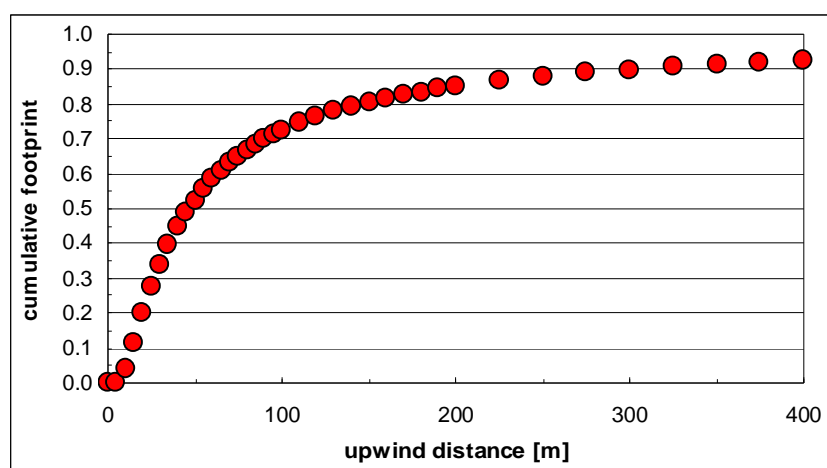
Výjimkou jsou některé případy severního proudění za neutrálního zvrstvení atmosféry, kdy závěrečný efekt způsobuje prudké klesání vzduchu k zemi. Eddy kovarianční data z těchto případů je nutno zpracovávat zvlášť.

6.3 Stanovení hlavní stopy (footprint)

Na naměřené hodnotě vertikálního toku CO_2 se odlišně podílejí místa různě vzdálená od měřícího stanoviště (významně se většinou podílejí místa vzdálená do stovek metrů od měřící věže, a to podle výšky umístění přístroje a rychlosti proudění vzduchu. Pro stanovení příspěvků jednotlivých míst slouží zdrojová váhová funkce (footprint function). „Integrál této zdrojové váhové funkce se nazývá kumulativní stopou (footprint). Umožňuje určit, jakým podílem přispívá k naměřené hodnotě toku část povrchu v rozmezí od místa měření po určitou

vzdálenost proti směru větru.“ (Sedlák P., Havránková K. *Horizontální rozsah vlivu lesního porostu na bodově měřené turbulentní toky*, s.139)

Objektem eddy kovariančního měření na Bílém Kříži je smrkový stejnověký porost. Zdrojová oblast eddy kovariančního měření dosahuje ve směru proti větru až 400 m od měřícího stožáru. (obr.6.2) Z toho vyplývá, že při jižním větru, který je na dané lokalitě převládající, se na změřených turbulentních tocích prakticky podílí pouze zájmový porost, který zasahuje až do vzdálenosti více jak 600 m, hlavní stopa měření tedy leží právě v zájmovém smrkovém porostu.



Obr. 6.2: Kumulativní normalizovaný tok v závislosti na vzdálenosti od místa měření (podle Sedlák P, Havránková K. *Horizontální rozsah vlivu lesního porostu na bodově měřené turbulentní toky*. *Meteorologické zprávy* 54 (5), s. 139)

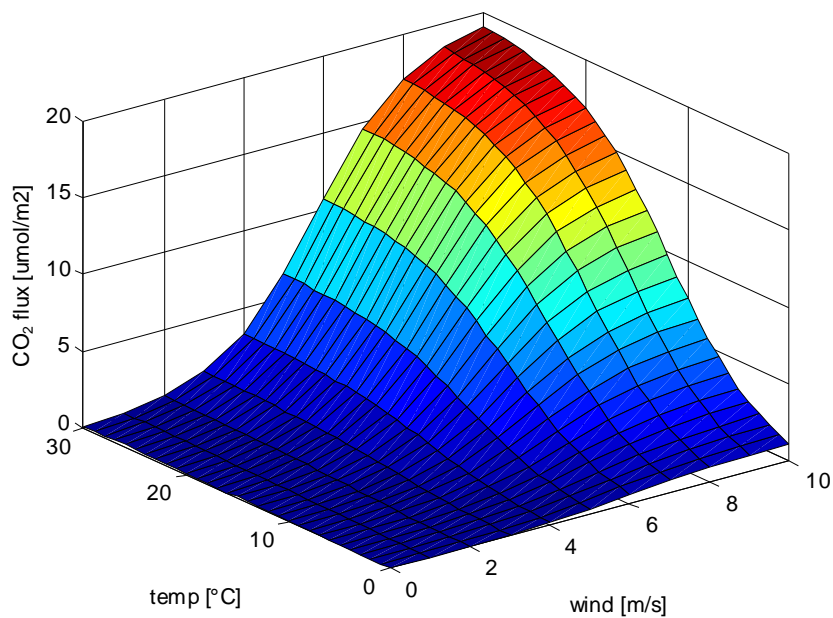
6.4 Výběr korektních dat

Z dat naměřených na EEP Bílý Kříž jsou k dalšímu zpracování použity výsledné hodnoty půlhodinových intervalů měření. Korektní data musí splňovat následující podmínky:

- 1) jižní proudění (135° až 225°),
- 2) rychlost větru převyšuje $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- 3) parametr turbulence se pohybuje v rozmezí 1,2 – 1,6

Po provedeném výběru korektních dat podle uvedených kritérií mohla být denní data použita v rozsahu 50 – 60 % úplného souboru denních dat. Denní data jsou zde charakterizována jako

data naměřené při nenulové ozáření porostu. Noční data jsou z důvodu nedostatečného turbulentního promíchávání vzduchu vyloučena všechna. Nedostatečné turbulentní promíchávání vzduchu v nočních hodinách prokazuje nalezená závislost toku CO_2 na třetí rychlosti proudění větru. Se zvyšující se třetí rychlostí tok CO_2 vzrůstá, dostatečnou turbulenci by signalizovala saturace toku CO_2 již při nízké třetí rychlosti (do $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). V nočních hodinách nalzáme závislost toku CO_2 jak na teplotě, která determinuje intenzitu vymývání CO_2 z porostu. (obr.6.3)



Obr. 6.3: Plošný graf závislosti eddy kovariančního toku CO_2 (CO_2 flux) ze smrkového porostu na teplotě (temp) a na rychlosti proudění vzduchu nad porostem (wind), EEP Bílý Kříž (podle Janouš D. a kol. Night time fluxes in the sloping terrain, Folia ecologica. (manuscript))

6.5 Doplnění chybějících dat (gap filling)

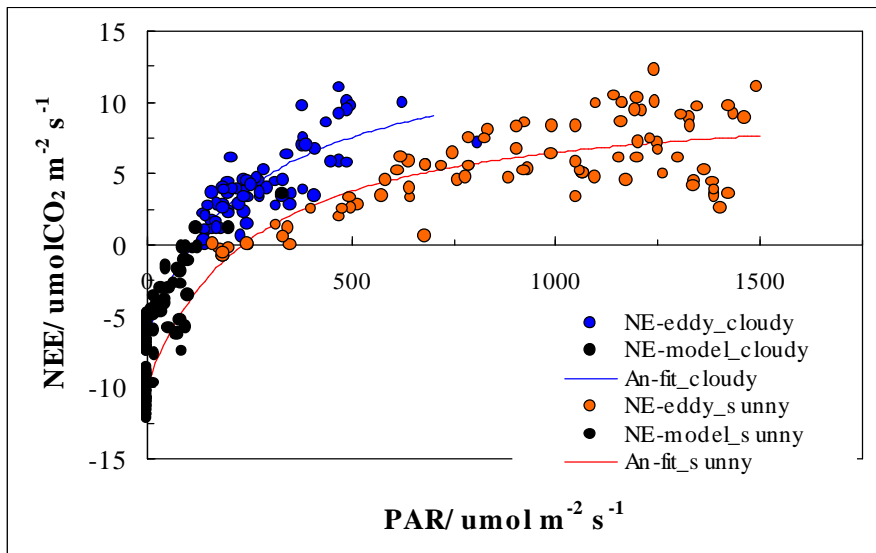
Chybějící data, tedy nenaměřená nebo nekorektní, je nutné doplňovat (gap filling). Doplnování krátkých výpadků je prováděno buď matematickou interpolací, nebo průměrnými hodnotami. Delší řady jsou vytvářeny pomocí empirických modelů založených na vztahu toků a naměřených mikroklimatologických charakteristik (dopadající záření, teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, rychlost větru).

Na EEP Bílý Kříž jsou Všechna chybějící data (výpadky měření a nekorektní data) modelována mimo jednotlivých výpadků, které jsou doplňovány interpolací. Model je parametrizován zvláště pro jednotlivé týdenní až měsíční periody růstové sezóny, a to z důvodu respektování vývoje porostu a stanovištních podmínek během růstové sezóny. Případně jsou navíc vyčleněny periody s významným vláhovým deficitem, pokud necharakterizují celé měsíční období.

Použitý model pro modelování čisté uhlíkové výměny ekosystému (**NEE**) se skládá ze dvou složek – vstupu uhlíku do ekosystému asimilací a ztráty uhlíku respirací. Asimilaci v modelu reprezentuje rychlost hrubé asimilace ekosystému (**P_E**), respektive hrubá primární produkce porostu (**GPP**), která je závislá na dopadajícím fotosynteticky aktivním záření (**FAR**). Respirace ekosystému (**R_E**) je modelována na základě závislosti respirace nadzemní biomasy na teplotě vzduchu v korunové části porostu a na základě závislosti půdní respirace na teplotě půdy.

V rámci podrobnější analýzy vztahu **P_E**, respektive **NEE** a dopadajícího **FAR** je model dále parametrizován zvláště pro zatažené dny, dny se střídavou oblačností a dny jasné. **P_E** je počítána odečtením **R_E** od korektně naměřených hodnot **NEE**.

Závislost **NEE** na intenzitě dopadajícího fotosynteticky aktivního záření vykazuje odlišnost pro dny s rozdílným typem záření. (obr.6.4) Zatažené dny mají vyšší hodnotu **NEE**, což je obecně způsobeno nižší denní teplotou a následně nižší ekosystémovou respirací. „Detailnější analýza prokázala i vyšší fotochemickou účinnost v zatažených dnech v porovnání se slunnými dny s obdobnou teplotou.“ (Havránková K. a kol. *Net ecosystem exchange of the mountain spruce stand is relatively higher under the days with prevailing diffusive solar radiation*, s.8). Toto je částečně způsobeno odlišným složením světla – difúzní radiace je charakteristická relativně vyšším podílem modrých ku červeným vlnovým délkám. I na úrovni jednotlivých letorostů je patrné, že v podmínkách stinného dne je fotochemická účinnost vyšší (až o 35%). Rovněž rychlost asimilace CO₂ může být, i přes nižší radiální příkon vyšší v porovnání s převládající přímou sluneční radiací. To souvisí s vyšším zastoupením světla v modré oblasti spektra, které napomáhá otvírání průduchů a zároveň v této oblasti leží absorpční maxima fotosynteticky aktivních pigmentů. Navíc ve dnech s přímou sluneční radiací může docházet k uzavírání průduchů, jakožto ochrannému mechanismu před nadměrnou transpirací, což vede ke snižování intercelulární koncentrace CO₂ v jehlicích a následnému poklesu rychlosti jeho asimilace.



Obr.6.4.: Závislost rychlosti čistého příjmu CO_2 lesním ekosystémem (NEE) na intenzitě dopadající fotosynteticky aktivní radiace (PAR = FAR). Oranžové body představují hodnoty toku CO_2 naměřené eddy-kovarianční metodou během jasných dnů, modré body představují hodnoty toku CO_2 naměřené ve dnech s difúzní radiací. Noční hodnoty (černé body) byly modelovány podle aktuální teploty a respirace jednotlivých částí ekosystému (půda, kmeny, větve, listoví). (podle Havránková K. a kol. Net ecosystem exchange of the mountain spruce stand is relatively higher under the days with prevailing diffusive solar radiation)

7. Výsledky

Použité zkratky: FAR – fotosynteticky aktivní radiace

Re – respirace ekosystému,

GPP – hrubá primární produkce,

NEE – čistá ekosystémová výměna uhlíku

Poznámky:

- è Čím je větší kladné číslo, tím je větší Re
- è Čím je větší záporné číslo tím je větší GPP.
- è Hodnota respirace je kladné číslo, protože CO₂ jde z porostu, uvolňuje ho – zdroj CO₂
- è Hodnota hrubé primární produkce je záporné číslo, protože CO₂ jde do porostu – spotřebič (sink) CO₂
- è NEE je rozdíl Re a GPP. Hodnota NEE je záporná, pokud ekosystém více CO₂ uloží než ho prodýchá. A naopak hodnota NEE je kladná, když ekosystém CO₂ více uvolní než uloží.

7.1 Grafy z celého roku 2004 (obrazová část - Příloha I, II, III)

Průměrná měsíční teplota dosahuje v lednu hodnoty 0,7°C a také následující dva měsíce (únor,březen) se podstatně nemění a nárůst je pouze 0,1°C. Až od dubna nastává zřetelné zvýšení hodnoty. Teplotního maxima dosahuje v červenci (13,3°C) a následně potom v srpnu je vyšší hodnota ještě viditelnější (14,3°C). Pokles teploty je mnohem pozvolnější než její nárůst. V září (10,5°C) je průměrná měsíční teplota vyšší jak v květnu (7,8°C). I říjnová průměrná měsíční teplota dosahuje vysokých hodnot (8,0°C). Pak již nastává propad až na prosincovou průměrnou měsíční teplotu, kde je hodnota stejná jako u lednové (0,7°C).

Měsíční průměr denní sumy FAR se měří pouze od března do listopadu, a přímo na Bílém Kříži od května do konce října (délka vegetační sezóna). Údaje z března, dubna a listopadu jsou z poskytnutých informací Českého hydrometeorologického ústavu. V prosinci, lednu a únoru nelze měřit, protože množství sněhu to nedovoluje. V březnu je hodnota

měsíčního průměru denní sumy FAR $3,2 \text{ MJ/m}^2$. Maxima ekosystém dosahuje v červenci a srpnu – pro oba měsíce stejná hodnota $7,1 \text{ MJ/m}^2$. V září je již nižší úhel dopadu FAR (slunce je šikmo) a tedy hodnota je nižší ($5,2 \text{ MJ/m}^2$). Z dostupných měření dosahuje měsíční průměr denní hodnoty FAR minima v listopadu ($0,7 \text{ MJ/m}^2$).

Křivka u respirace má podobný tvar jako křivka u průměrné teploty. Proto nárůst měsíčního průměru denní sumy respirace zaznamenáváme až od dubna ($101,4 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den). Maximální hodnoty dosahuje v letních měsících, především v červenci ($404,1 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den) a srpnu ($422,9 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den). V srpnu dochází ke kulminaci, pak v září je již rapidní pokles ($296,1 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den). V prosinci dosahuje stejných hodnot jako v lednu ($10,5 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den).

Měsíční průměr denní sumy GPP má v prosinci, lednu a únoru nulovou hodnotu, protože nelze měřit z důvodu množství sněhu. Měsíční průměr denní sumy GPP se měří až v březnu ($-76,9 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den). Následně zaznamenáváme nárůst až do června ($-549,4 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den). Až do srpna se měsíční průměr denní sumy drží nad hranicí $-500 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den. Poté už nastává zřetelný pokles, kdy měsíční průměr denní sumy GPP dosahuje v listopadu $-34,6 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den.

Měsíční průměr denní sumy NEE je v lednu ($10,5 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den) a v únoru ($10,6 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den) kladný. Již v březnu je větší měsíční průměr denní sumy GPP než měsíční průměr denní sumy Re. Hodnota v březnu dosahuje $-32,4 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den. Pak pozorujeme viditelný nárůst. K zajímavému zjištění patří především to, že nejvyšších hodnot dosahuje ekosystém v dubnu ($-210,0 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den) a v květnu ($-227,0 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den). Poté už v celkové bilanci měsíční průměr denní sumy NEE klesá. Ještě v červnu ($-197,6 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den) a červenci ($-140,5 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den) jsou hodnoty dosti vysoké. Avšak v srpnu je již hodnota skoro poloviční ($-79,6 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den). Je to způsobeno především vysokou teplotou a s tím související vysokou respirací. Kladné hodnoty dosahujeme až v listopadu ($19,9 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den). V tomto období je měsíční průměr denní sumy Re větší než měsíční průměr denní sumy GPP. Pak je tedy kladná hodnota. V prosinci je opět stejná teplota jako v lednu ($10,5 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$ za den).

7.2 Grafy z období od 10.-19.8 2004 (obrazová část – Příloha IV, V, VI)

Teplota se od 10.srpna (16°C) postupně zvedá až do 12.srpna (18,5°C), poté následuje ochlazení, které se zastavuje 14.srpna na teplotě 12,5°C. Teplota znovu začíná narůstat až do svého maxima, kterého dosahuje 19.srpna (19,7°C)

Zvýšená teplota způsobuje i vysokou respiraci ekosystému. Čím více se teplota zvyšuje, tím více se zvyšuje respirace. Můžeme zde najít přímou úměrnost. Křivka u průměrné teploty má podobný tvar jako křivka u respirace. Je zde exponenciální funkce vztahu průměrné teploty a respirace.

Respirace narůstá od 10.srpna z hodnoty 484,7 kg CO₂ . ha⁻¹ až do 12.srpna na hodnotu 568,4 kg CO₂ . ha⁻¹. S ochlazením teploty se snižuje i respirace. Minima dosahuje 14.srpna (360,5 kg CO₂ . ha⁻¹). Je to způsobeno především nižší teplotou než která byla v předchozích dnech. Poté hodnota respirace se opět navyšuje až do svého maxima, kterého dosahuje 19.srpna (618,2 kg CO₂ . ha⁻¹).

FAR má 10.srpna hodnotu 10,9 MJ/m² a během 4 dnů klesne až na 2,7 MJ/m² (14.8.). Právě 14.srpna dosahuje svého nejnižšího bodu, který můžeme pozorovat na grafu. Tento rapidní pokles je způsoben změnou počasí, tj. především je zataženo, slunce nemůže ekosystému poskytnout fotosynteticky aktivní radiaci v takové míře jako při jasném počasí.

Od 10.srpna GPP z hodnoty -639,0 kg CO₂ . ha⁻¹ postupně klesá (směrem ke kladným hodnotám) až do 13.srpna na hodnotu -329 kg CO₂ . ha⁻¹. Poté 14.srpna nastává znovu vzestup způsobený jak nárůstem teploty, tak i nárůstem FAR. V následujících dnech se GPP pohybuje na zhruba stejné hodnotě. Svého vrcholu dosahuje GPP 19.srpna (-599,7 kg CO₂ . ha⁻¹).

Od 10.srpna dochází k poklesu ukládání CO₂ (-154,3 kg CO₂ . ha⁻¹) až na své minimum (91,9 kg CO₂ . ha⁻¹), kdy je rostlina zdrojem CO₂. Je to způsobeno především nízkou hodnotou FAR a částečně i teplotou. 14.srpna je hodnota NEE stále v plusové hodnotě. Dochází k mírnému navýšení NEE, tj. zvýšení GPP, snížení Re. Hodnota je stále plusová. Ale další den dochází k obratu. 15.srpna dosahuje NEE nejvyšší záporné hodnoty (-218 kg CO₂ . ha⁻¹). Je to důsledkem nárůstu FAR (9,0 MJ/m²), která zajišťuje jasné počasí, teplota i respirace zůstávají zhruba na stejné hodnotě jako v předešlém dnu. Poté už NEE opět klesá, FAR zůstává stejný, pak zaznamenáváme mírné navýšení. Avšak se zvedá teplota samozřejmě i respirace. I když GPP dosahuje vysokých hodnot, tak 19.srpna kdy je nejvyšší

teplota, vysoký FAR, vysoká respirace, ale nižší GPP, v konečném součtu je NEE kladná (18,5 kg CO₂ · ha⁻¹). Ekosystém je tedy zdrojem CO₂.

Zde v grafu můžeme určit příčiny kladné hodnoty NEE:

- 1) 13. a 14. srpna – Je zataženo, a proto je nízká hodnota FAR. Nízká hodnota FAR způsobí nižší GPP.
- 2) 19. srpna – Je jasné počasí, ale velmi vysoká teplota. Ta způsobí větší hodnotu Re než je hodnota GPP.

Pro ekosystém je nejvýhodnější, když se teplota pohybuje kolem 12°C a je vysoká hodnota FAR (9-10MJ/m²). Poté ekosystém uloží CO₂ více než ho prodýchá. Stává se tedy sinkem a ne zdrojem CO₂.

7.3 Plošné grafy čisté ekosystémové výměny (NEE) v kg biomasy na 1 ha smrkového porostu na EEP Bílý Kříž v určité hodině určitého dne od března do října 2004 (obrazová část – Příloha VII, VIII)

Poznámky:

- è kladná hodnota vyjadřuje respirační ztrátu organické hmoty
- è záporná hodnota vyjadřuje nárůst organické hmoty asimilací.
- è 1 kg oxidu uhličitého odpovídá 0,650 kg biomasy.

Na lokalitě Bílý Kříž se začíná zřetelný nárůst biomasy již od konce března, ale jen mezi 9:00 a 15:00. To v dubnu dochází už trvalejšímu nárůstu biomasy už v 8 hodin a zpravidla končí kolem 17. hodiny. Zde stále leží sníh, který taje až koncem dubna. V květnu je nárůst organické hmoty asimilací již plně funkční. Asimilace probíhá od 6 hodiny ráno až do 18 hodin. V červnu je obrovská asimilace avšak dochází ke zřetelnému nárůstu respirace během nocí, které jsou velmi teplé. Může zde také vidět to, že v červnu může být v poledne respirace větší jak asimilace. To je především způsobeno vysokou teplotou s tím související vysokou respirací a nízkou hodnotou fotosynteticky aktivní radiace. Ten den bylo zataženo, ale byla velmi vysoká teplota. V červenci je podobný stav, ale asimilace není tak vysoká a je stále vysoké respirace během nocí. Nejteplejší noci jsou však v srpnu a tedy je vysoká respirace. Nárůst organické hmoty asimilací již klesá a jeho doba se zkracuje a probíhá od 6 hodin do 17 hodiny. V září začíná asimilace až kolem 7. hodiny a končí kolem 17. hodiny. Respirace už klesá. V říjnu je podobný stav jako v březnu – asimilace je nízká a probíhá od 9 hodiny až do 15 hodiny a to ne každý den.

8. Metodika výzkumu

červenec 2004 – seznámení s tématem, úvod do problematiky ekologie

srpen 2004 – pracovní pobyt na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž,
– seznámení s měřicí technikou, vlastní měření
– pomoc pracovníkům Ústavu ekologie krajiny Akademie Věd ČR

září – listopad 2004 – vyhledávání a zpracování materiálů potřebných k práci

prosinec 2004 – leden 2005 – vlastní zpracování a vyhodnocení dat získaných z měření na
Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž

leden 2005 – únor 2005 – samotná realizace práce, dokončení výzkumu, zhodnocení

9. Abstrakt

V současnosti je klima Země pravděpodobně ovlivňováno zřetelnými změnami, jež jsou obecně shrnovány pod pojmem „globální klimatické změny“. GKZ mohou být definovány jako „dlouhodobé fluktuace teploty, množství srážek, rychlosti větru a ostatních složek atmosféry Země“. Mají antropogenní původ – původcem je člověk a jeho činnost.

Za podstatně příjemnější podnebí (průměrná teplota 15°C) vděčíme skupině plynů v zemské atmosféře, která zadržuje část unikajícího tepla a posílá ho zpět na zem. Díky tomu neklesají noční teploty hluboko pod bod mrazu. Sluneční paprsky putují vesmírem ve formě krátkovlnného záření, které se ovšem na Zemi mění v dlouhovlnné (tepelné neboli infračervené). Tyto plyny krátkovlnnou radiaci propustí, dlouhovlnnou už jen částečně. Atmosféra tedy funguje na stejném principu jako skleník. Proto se také tomuto jevu říká skleníkový efekt a plyny, které to způsobují nazýváme skleníkovými plyny. Do skupiny skleníkových plynů je především zařazován oxid uhličitý, jenž je do atmosféry uvolňován pálením fosilních paliv a stále probíhajícím odlesňováním, vodní pára, freony, jenž jsou do atmosféry uvolňovány s chladících zařízení či jiných průmyslových aktivit, metan, který je důsledkem metabolismu stále se zvyšujícího počtu hospodářských zvířat či rozličných způsobů využití krajiny, a oxidy dusíku jež jsou produkty průmyslové činnosti a dopravy.

Hrozbu možných důsledků své činnosti ve změně klimatu lidé rozpoznali teprve až v posledních letech 20. století a začali společně reagovat. Mezinárodní spolupráce vědců a politiků vyvrcholila formulováním v tzv. Kyotský protokol. V letech 2008 - 2012 by mělo dojít ke snížení produkce CO₂ o 5,2 % oproti stavu v roce 1990. Jedná se o snahu intervenovat vývoj národních emisí skleníkových plynů. To je velmi citlivý problém úzce související s vývojem národních ekonomik. Kyotský protokol vstoupil v platnost 16. února 2005.

Stoupající koncentrace CO₂ v atmosféře odráží současný globální cyklus uhlíku, ve kterém je více uhlíku do atmosféry uvolňováno než je absorbováno jeho spotřebiči. Limitace současných možností plného pochopení globálního cyklu uhlíku spočívá ve stanovení hodnověrné bilance uhlíku v systému „atmosféra – biosféra“. To především vyžaduje přesné stanovení nejen kapacit zdrojů, ale i spotřebičů (sinků) atmosférického uhlíku a to jak v měřítku globálním, tak i v měřítku konkrétních oblastí. Místo, které poskytuje úložiště, tj.

spotřebovává atmosférický uhlík (CO_2) z ovzduší, nazýváme sinkem. V globálním klimatickém systému právě lesy ukládají v nadzemní biomase 80 % a v podzemní biomase 40 % uhlíku deponovaného v suchozemských ekosystémech. Proto výzkumy zaměřené na odhalení vazeb mezi fotosyntetickou aktivitou lesních dřevin (porostů), produkcí/distribucí biomasy a působením zvýšené koncentrace CO_2 jsou významné.

To, že GKZ jsou především důsledkem lidské činnosti, dokládá řada literárních údajů, které zachycují nárůst globální koncentrace CO_2 a ostatních skleníkových plynů od poloviny 18. století. V této době činila koncentrace CO_2 v atmosféře $270 - 280 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, zatímco současná koncentrace CO_2 činí asi $370 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ s ročním nárůstem $1,2 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. V roce 2045 by měla být koncentrace dvojnásobná proti stavu současnému ($700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$).

EEP Bílý Kříž bylo založeno v roce 1986 v rámci projektu „Komplexní výzkum vlivu imisí na lesní hospodářství Beskyd“, a to původně jako klimatologická stanice umístěná v lesním prostředí. Z původní klimatologické stanice tak bylo postupně vybudováno rozsáhlé ekologické pracoviště řešící celou řadu problémů životního prostředí zejména metodami ekologické fyziologie. V současnosti je EEP Bílý Kříž významným bodem mezinárodní monitorovací sítě uhlíkového cyklu terestriálních ekosystémů (CARBOEUROFLUX). Na pracovišti jsou mimo jiné řešeny projekty programu CARBOEUROPE a národní projekt CZECHCARBO, pracoviště získalo statut výzkumné infrastruktury EU pro výzkum dopadů klimatické změny na evropské lesy (projekt MERCI).

Eddy kovarianční metoda je nejrozšířenější metoda měření toků energií a látek mezi jakýmkoliv povrchem a atmosférou, nejčastěji využívaná pro ohodnocení schopnosti ekosystému vázat CO_2 . Její využití v dlouhodobých výzkumech toků uhlíku mezi ekosystémy a atmosférou umožnily až v devadesátých letech minulého století komerčně dostupné infračervené spektrometry použitelné v terénních podmínkách.

Cílem předložené práce je na základě výsledků získaných na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž popsat úroveň uhlíkových zdrojů a sinků (spotřebičů) horského smrkového porostu a jejich citlivost k faktorům prostředí, a tím přispět k procesovému poznání v systémové ekologii lesa. Tyto experimenty jsou důležité pro zjištění možných dopadů budoucího prostředí na daný ekosystém a na jeho schopnost dále vázat vzdušný uhlík.

10. Závěr

Tato práce vychází z výsledků převážně získaných při observačních experimentech uskutečňovaných na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž, který slouží jako významný bod mezinárodní monitorovací sítě uhlíkového cyklu terestrických ekosystémů. Cílem experimentů bylo popsat biofyzikální úroveň uhlíkových zdrojů a sinků horského smrkového porostu a jejich citlivost k faktorům prostředí. Mým úkolem bylo také zjistit, zda lesní porost je na EEP Bílý Kříž zdroj nebo sink (spotřebič) CO₂. Má hypotéza, že lesní porost je stále sinkem, se mi potvrdila. Avšak není to tak v každém období například v období zimních měsíců (leden, únor, prosinec) a v listopadu byl při průměrné měsíční sumě denní čisté ekosystémové výměny (NEE) zdrojem CO₂. Pro ekosystém je nejvýhodnější, když se teplota pohybuje kolem 12°C a je vysoká hodnota fotosynteticky aktivní radiace - FAR (9-10MJ/m²). Poté ekosystém uloží CO₂ více než ho prodýchá. Stává se tedy sinkem a ne zdrojem CO₂.

Přínosem mé práce může být především to, že většina děl zabývajících se poutáním oxidu uhličitého lesním porostem a spojitosti s globální změnou klimatu je publikováno skoro výhradně v angličtině. Uvedená problematika má skutečně aktuální charakter například Kyoto protokol, dopady skleníkového efektu na lidstvo atd. Mělo by dojít k většímu omezení antropogenních emisí a neekologické technologie a postupy by se měli nahrazovat šetrnějšími. Lidstvo by se mělo rozhodnout, jak postavit k tomuto reálnému problému 21. století a začít ho řešit, aby byl přinejmenším zachován současný stav a nedocházelo k ještě větším „zkázám“.

Na danou problematiku nahlížím z pohledu, jak by se daly využít terestrické ekosystémy zvláště lesní porosty při řešení těchto důsledků vzniklých činností člověka.

11. Použitá literatura

- Anderson, J.W.** Export of light-generated reducing equivalents from illuminated chloroplasts by shuttle mechanism. In: *Membranes and Transport*. Plenum Publ. Corp. 1982, s. 611
- Aubinet, M. a kol.** Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology, *Advances in Ecological Research* 30: 2000, s. 160-161
- Aubinet, M. a kol.** Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology, *Advances in Ecological Research* 30: 2000, s.113
- Aubinet, M. a kol.** (2004) Comparing CO₂ storage and advection conditions at night at different CARBOEUROFLUX sites. *Boundary Layer Meteorology*: 2004
- Cannel, M.G.R. a kol.** National inventories of terrestrial carbon sources and sinks: *The UK experience*. *Climatic Change* 42: 1999, s. 505
- Conway, T.J. a kol.** Atmospheric carbon dioxide measurements in the remote global troposphere. *Tellus* 40B: 1986, s.81
- Dixon, R.K. a kol.** Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 1994, s. 185
- Dvořák, V. a kol.** Radiation use efficiency of a mature Norway spruce stand. *Ekológia* 18: v tisku, 1997
- Eamus, D., Jarvis, P.G.** The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. In: *Advances in Ecological Research*. Academic Press., London-Tokyo-Toronto: 1989, s. 10,15,17, 30
- Edwards, G., Walker, D.** *C₃, C₄: Mechanisms, and Cellular and Environmental Regulation of Photosynthesis*. Blackwell Sci. Publ. Oxford, 1983
- Farquhar, G. D. a kol.** Vegetation effects on the isotope composition of oxygen in atmospheric CO₂. *Nature* 363: 1993, s. 439
- Gucinski, J. a kol.** Biomass, growth and carbon allocation. In: *The likely Impact of Rising CO₂ and Temperature on European Forests*: University of Edinburgh, 1995, s.128
- Havránková, K., Janouš, D.** Analysis of the air flow above the mountain spruce stand in the locality Bílý Kříž in Moravian-Silesian Beskyds during the vegetation season 1999. *Zpravodaj Beskydy* 13: 2000, s. 71

- Havránková, K. a kol.** Air flow over a young spruce forest: *I. Wind direction analysis and mean vertical wind speed profiles*. Zpravodaj Beskydy 1: 2001, s. 77
- Havránková, K. a kol.** Net ecosystem exchange of the mountain spruce stand is relatively higher under the days with prevailing diffusive solar radiation. Poster in: X. Dni fyziologie rostlín, Katedra fyziologie rostlín PrifUK a Botanický ústav SAV, 6.-9.9.2004 Bratislava: 2004
- Houghton, R. A. a kol.** Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere. *Ecological Monographs* 53: 1983, s. 236
- Hurtalová, T. a kol.** Deformation of air flow over a young spruce forest stand. Contributions to Geophysics and Geodesy, 32/3: 2002, s. 237
- Janouš, D. a kol.** Night time fluxes in the sloping terrain, *Folia oecologica*. (manuscript): 2004
- Jarvis, P.G.** Atmospheric carbon dioxide and forests. In: *Forests, Weather and Climate*. Philosophical Transactions of the Royal Society, Series B., London: 1989, s. 54
- Jarvis, P. G., McNaughton, K. G.** Stomatal control of transpiration. *Advances in Ecol. Res.* 15: 1986, s. 19
- Kramer, P. J.** Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *BioScience* 31: 1981, s. 29-30
- Krauchi, N.** Potential impacts of a climate change on forest ecosystems. *Eur. J. Forest Path.* 23: 1993, s.28
- Malhi, Y. a kol.** The carbon balance on tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22: 1999, s. 715, 717
- Monteith, J.L.** Climate and efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Trans. of the Royal Soc. of London, Series B* 281: 1977, s. 277
- Nátr, L.** Koncentrace CO₂ a rostliny. ISV nakladatelství, Praha.2000
- Nátr, L.** Fotosyntetická produkce a výživa lidstva. ISV nakladatelství, Praha.2002
- Pettersson, R., McDonald, J. S.** Effects of nitrogen supply on the acclimation of photosynthesis to elevated CO₂. *Photosynth. Res.* 39: 1994, s. 389

- Radoglou, K.M., Jarvis, P. G.** Effects of CO₂ enrichment on four poplar clones. II. Leaf surface properties. *Annals Bot.* 65: 1990, s.627
- Raper, P.C., Peedin, G. F.** Photosynthetic rate during steady state growth as influenced by CO₂ concentration. *Bot. Gazette* 139: 1978, s. 147
- Rogers, H.H. a kol.** Response of agronomic and forest species to elevated atmospheric carbon dioxide. *Science* 220: 1983, s. 428-429
- Ruimy, A. a kol.** CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiatio: a review. *Adv. Ecol. Res.* 26: 1995, s.18
- Russell, G. a kol.** Absorption of radiation by canopies and stand growth. In: *Plant Canopies: their growth form and function.* Cambridge Univ. Press.: 1988, s. 21
- Sedlák, P. Havránková, K.** Horizontální rozsah vlivu lesního porostu na bodově měřené turbulentní toky. *Meteorologické zprávy* 54 (5): 2001, s.139
- Smith, T.M. a kol.** The global terrestrial carbon cycle. *Water, Air and Soil Pollution* 70: 1993, s.19-20
- Stitt, M.** Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. *Plant Cell Environment* 14: 1991, s.743
- Strain, B. R., Bazzaz, F.** Terrestrial plant communities. In: *CO₂ and Plants: The response of Plants to Rising Levels of Atmospheric carbon Dioxide,* Westview Press, Boulder: 1983, s.177
- Tans, P.P. a kol.** Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247: 1990, s. 1431
- Telewski, F.W., Strain, B.R.** Densiometric and ring width analysis of 3-year-old *Pinus tadea* L. and *Liquidamber styracifua* L. grown under three levels of CO₂ and two water regimes. In: *Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree Ring Analysis,* Springfield, Virginia: 1987, s.189
- Thomas, R. B., Strain, B. R.** Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. *Plant Physiol.* 96: 1991, s. 629
- von Cammerer, S., Farquhar, G. D.** Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153: 1981, s. 376, 379

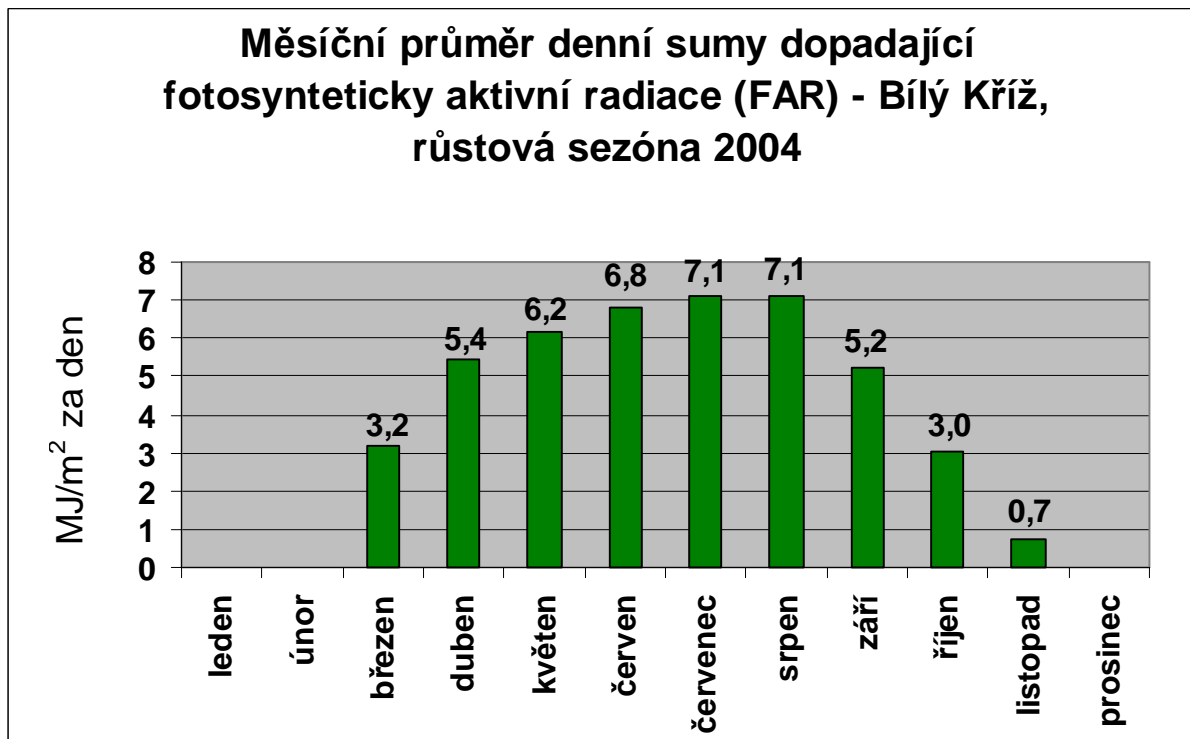
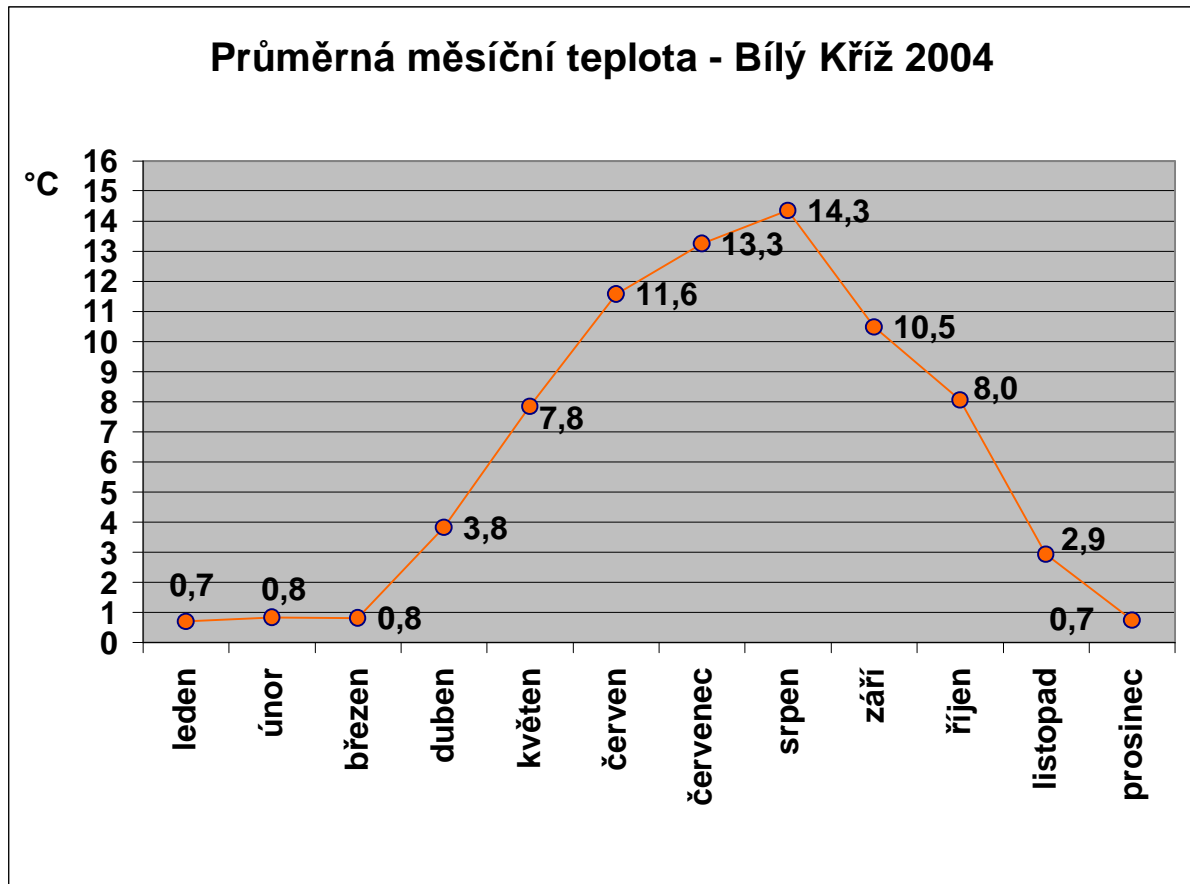
Warrick, R. A. a kol. Assessing the response of food crops to the different effects of increased CO₂ and climatic change. In: *The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystem. Scope 29*: 1986, s.393

Watson, R.T.a kol. Greenhouse gasses and aerosols. In: *Climate Change: The IPCC Scientific Assesment*. Cambridge Univ. Press: 1990, s. 5

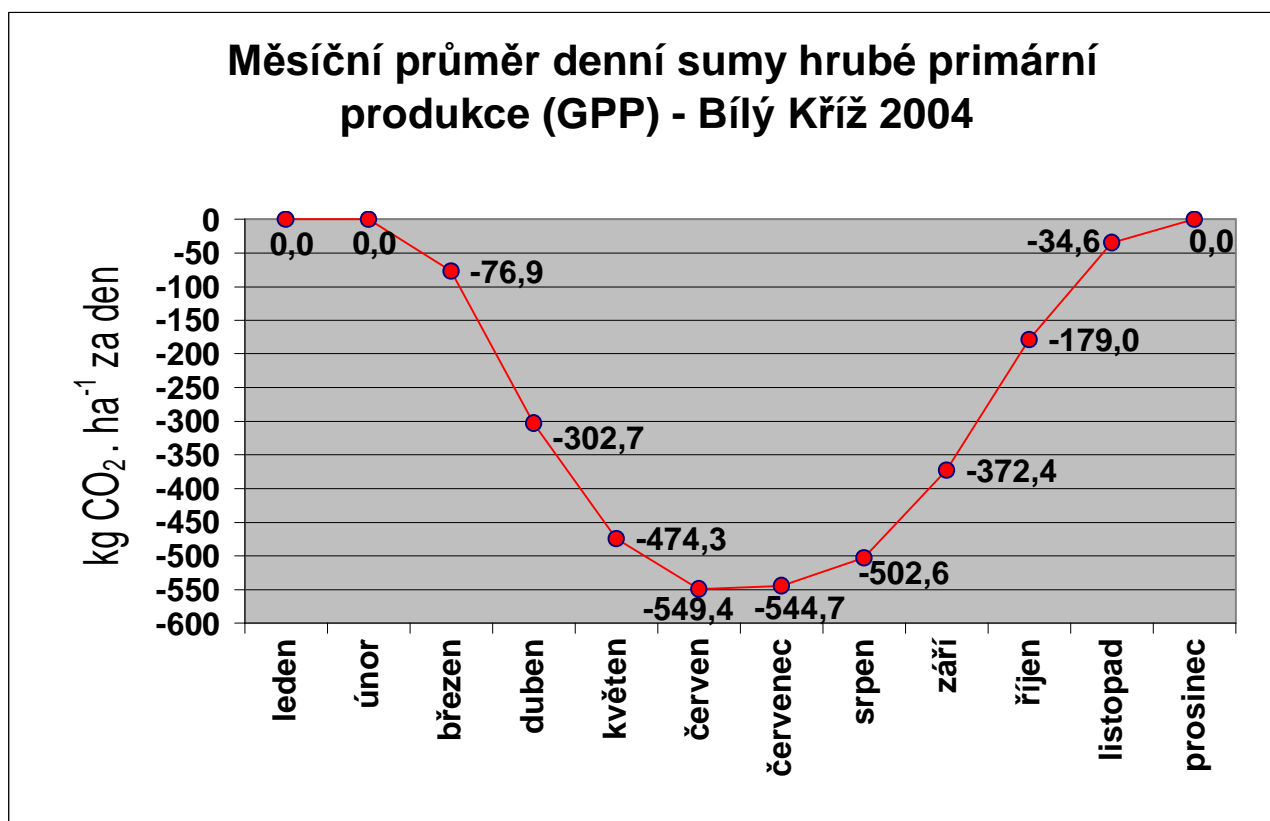
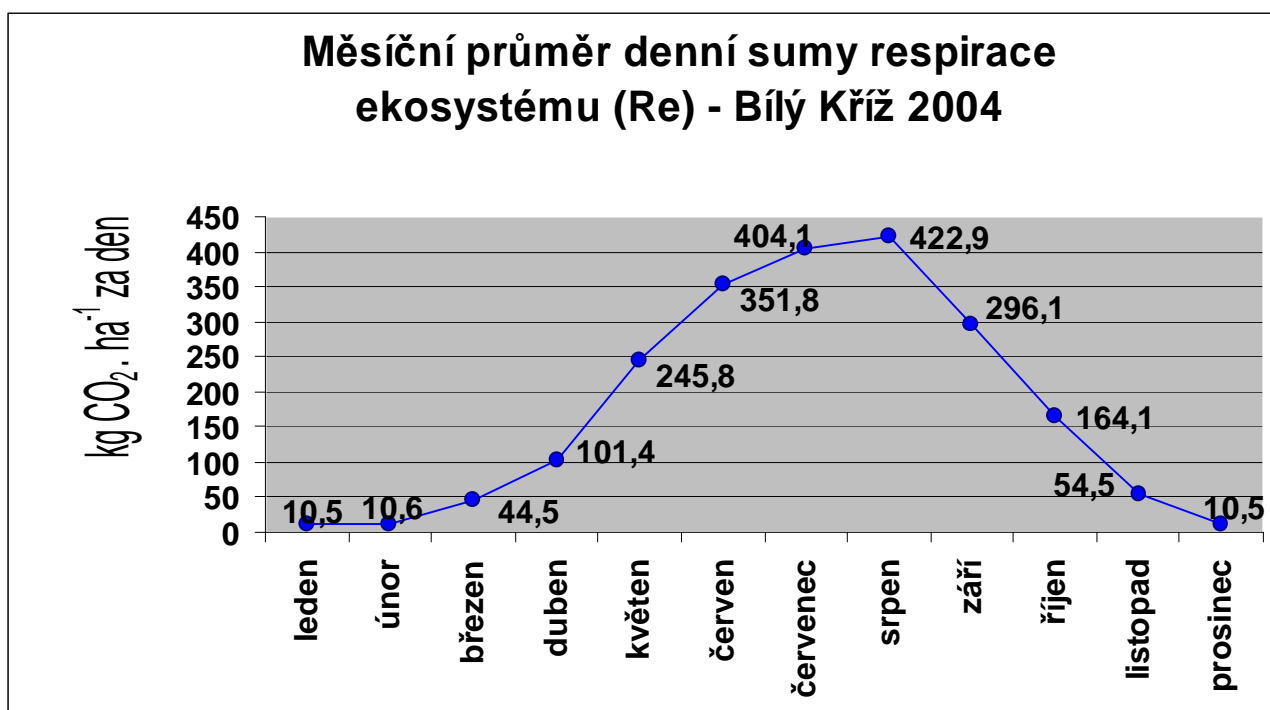
Watson, R.T. a kol. Land use, land-use change, and forestry. A special report of the IPCC. Cambridge University Press: 2000

Woodward, F.I. Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from preindustrial levels. *Nature 327*: 1987, s. 617

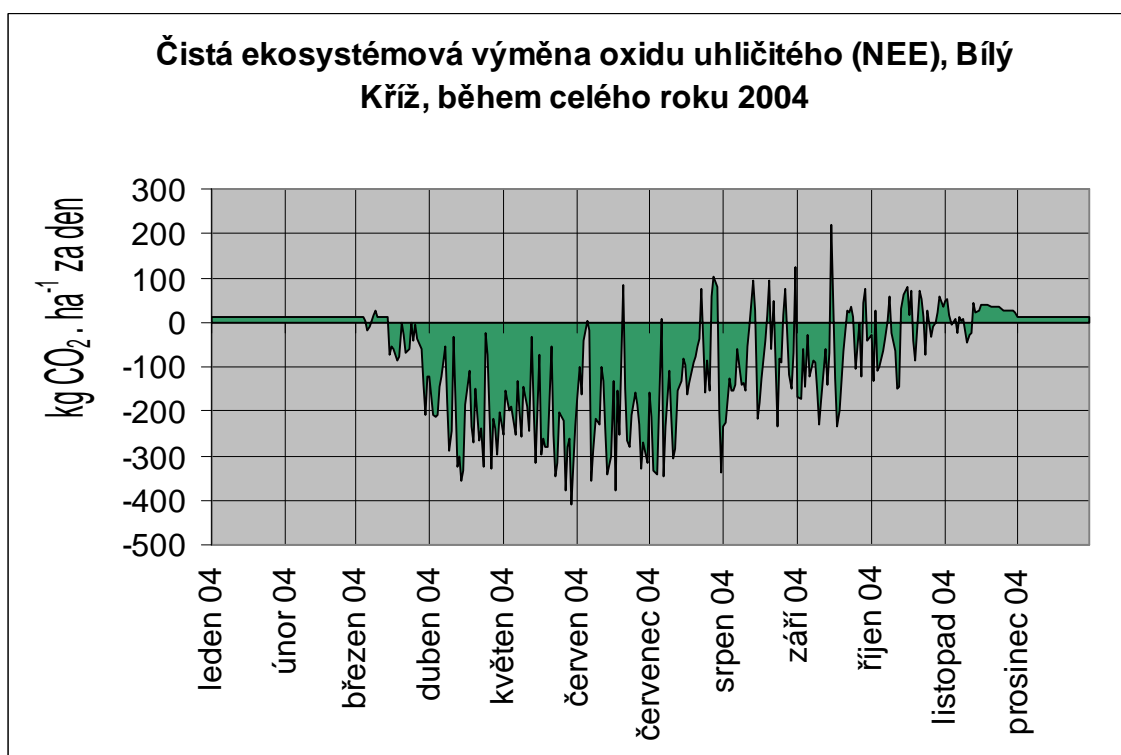
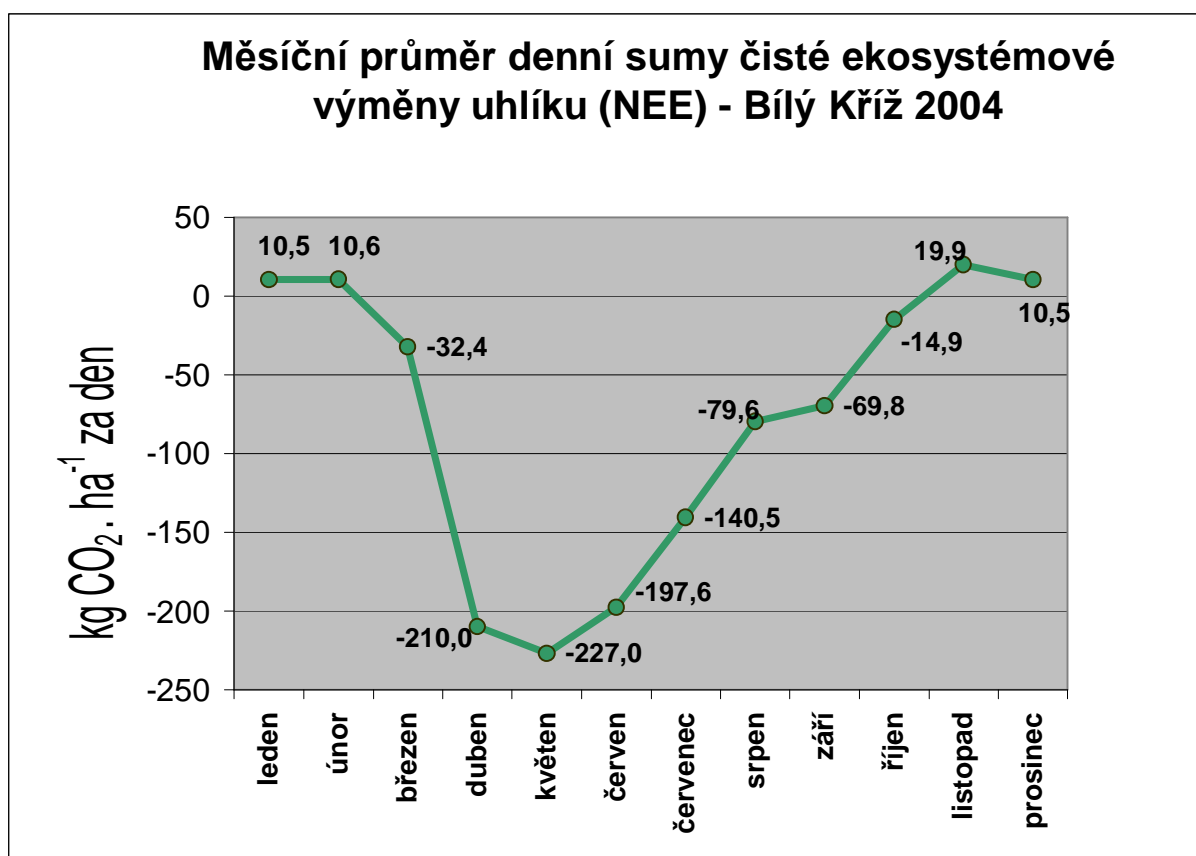
Příloha I



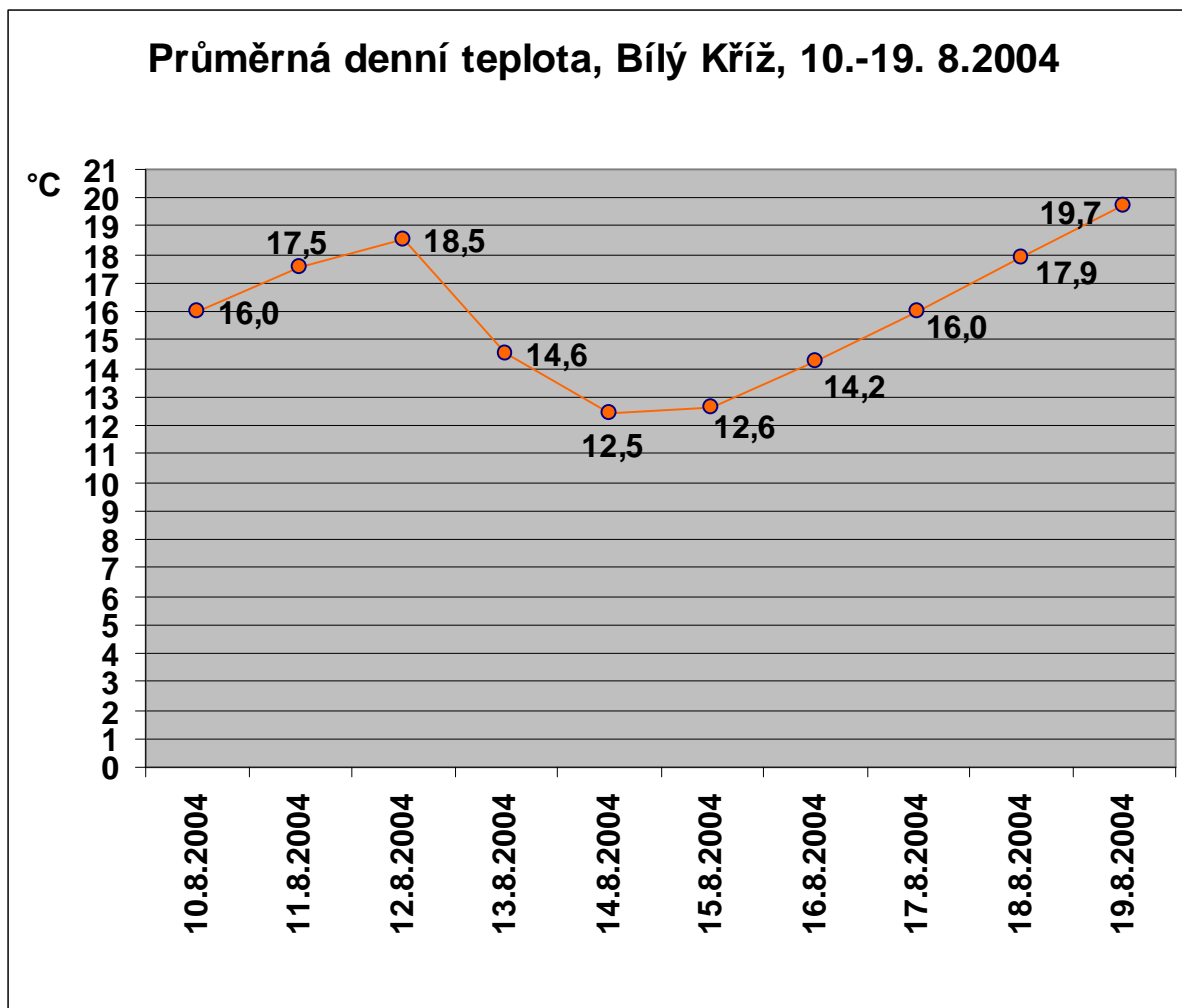
Příloha II



Příloha III

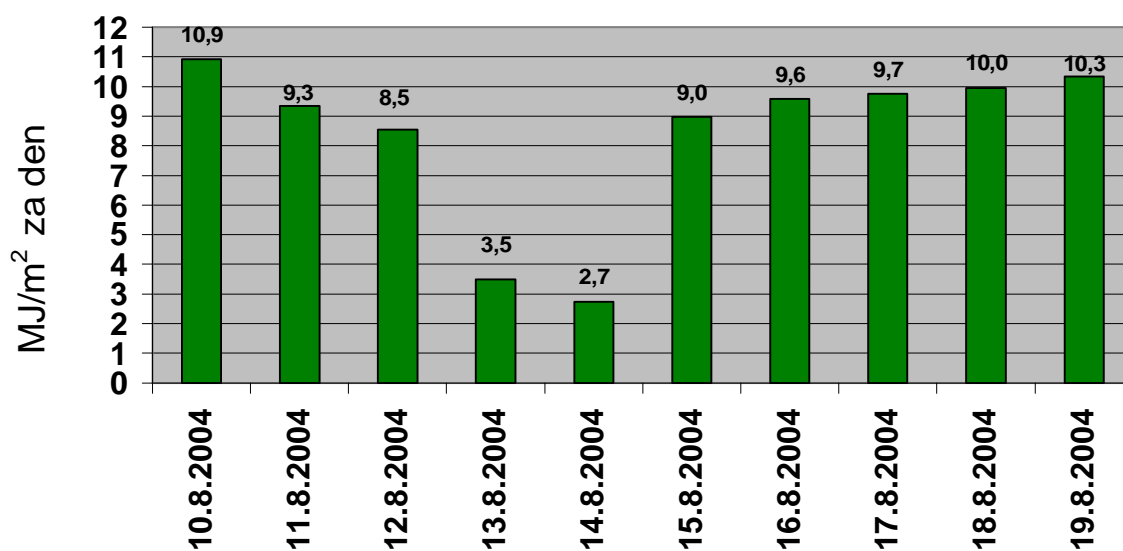


Příloha IV

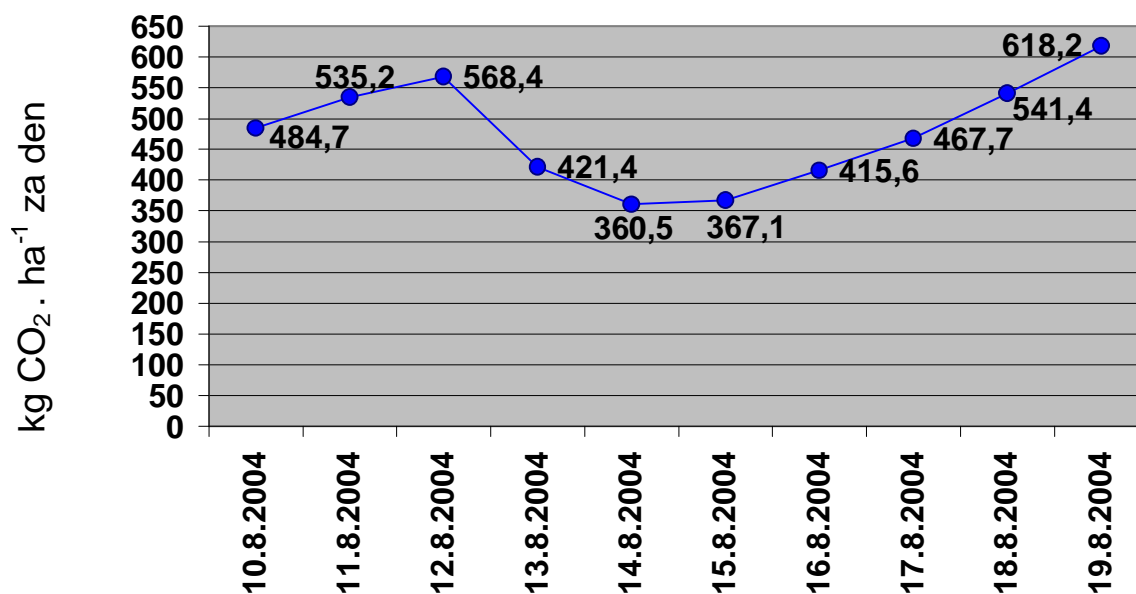


Příloha V

Denní hodnoty dopadající fotosynteticky aktivní radiace (FAR), Bílý Kříž, 10.-19. 8. 2004

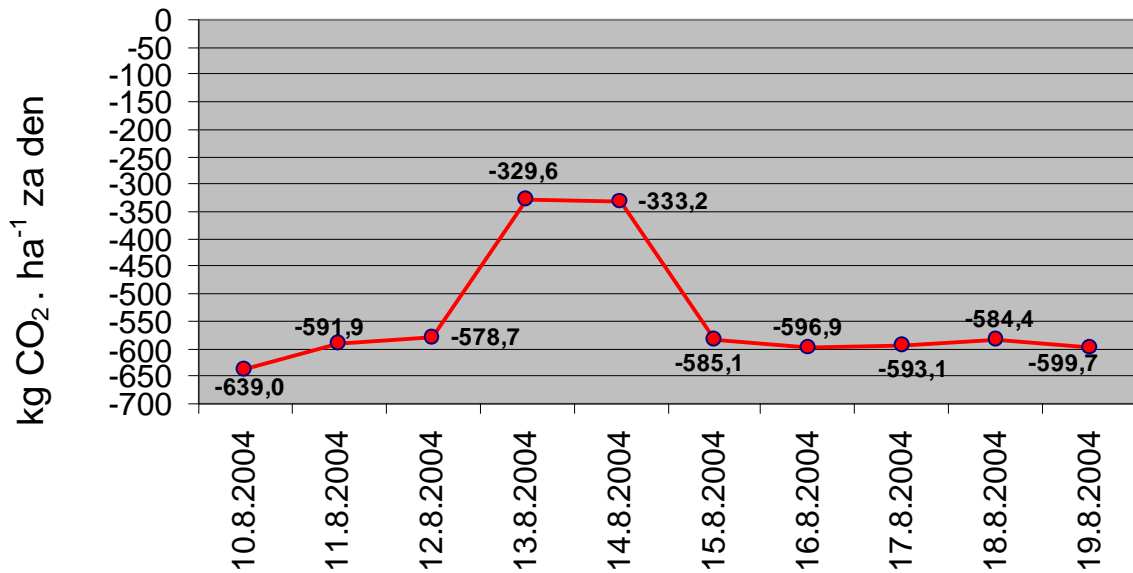


Denní hodnoty respirace ekosystému (Re), Bílý Kříž, 10.-19.8. 2004

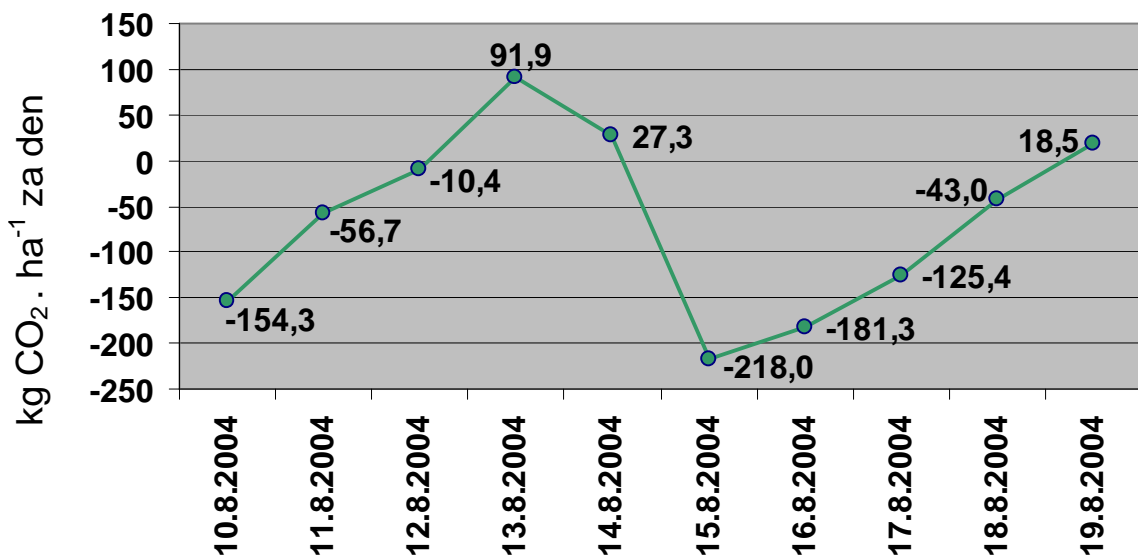


Příloha VI

**Denní hodnoty hrubé primární produkce (GPP),
Bílý Kříž, 10. -19.8. 2004**



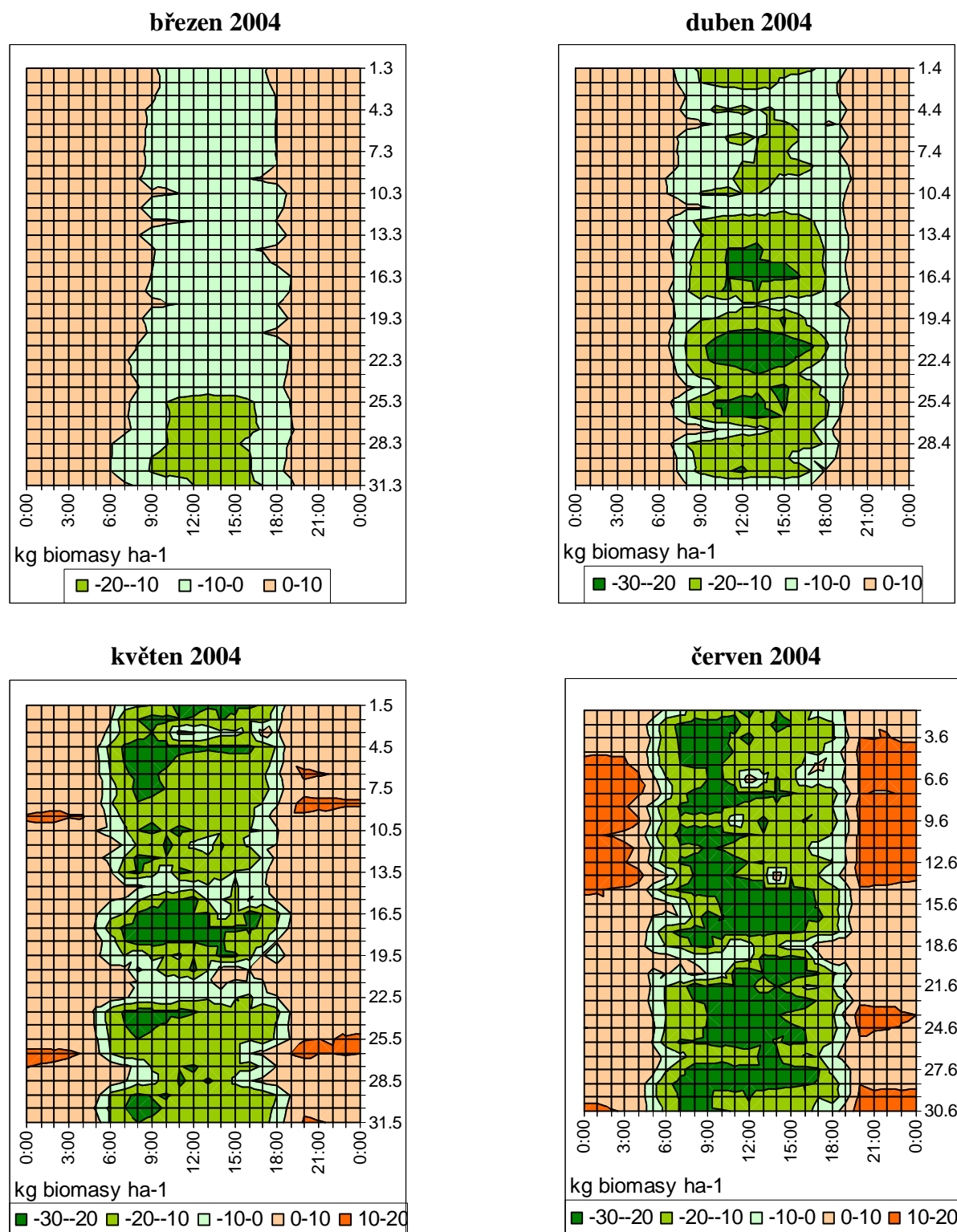
**Denní hodnoty čisté ekosystémová výměna uhlíku
(NEE), Bílý Kříž, 10.-19.8. 2004**



Příloha VII

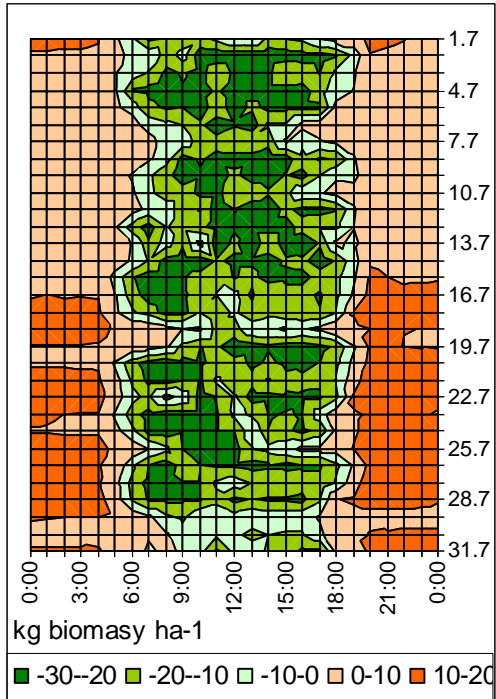
Obr. Plošný graf čisté ekosystémové výměny (NEE) v kg biomasy na 1 ha smrkového porostu na EEP Bílý Kříž v určité hodině určitého dne od března do října 2004, kladná hodnota vyjadřuje respirační ztrátu organické hmoty, záporná hodnota vyjadřuje nárůst organické hmoty asimilací.

Pozn.: 1 kg oxidu uhličitého odpovídá 0,650 kg biomasy.

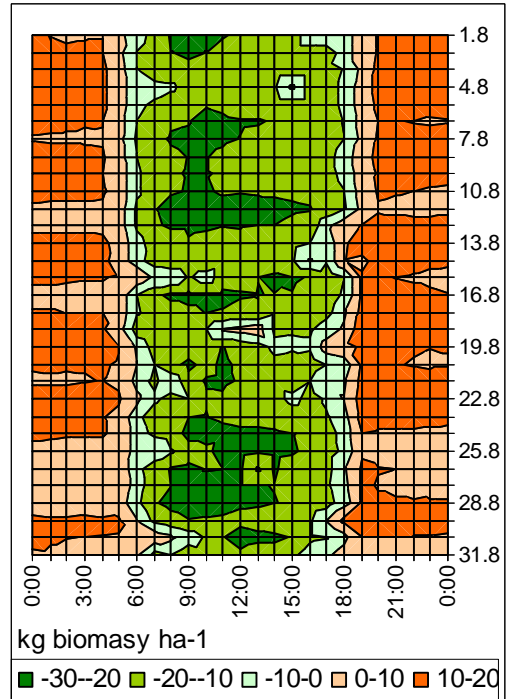


Příloha VIII

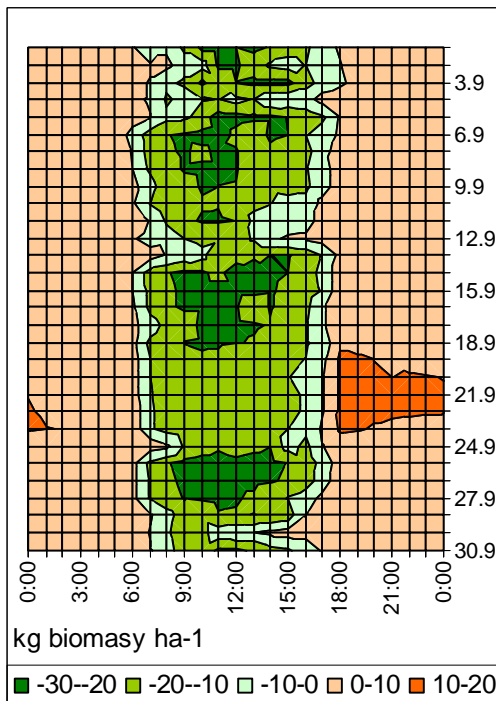
červenec 2004



srpen 2004



září 2004



říjen 2004

