

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Modelování a simulace

4) Uhlíková stopa v zemědělství, lesnictví a zpracovatelském průmyslu

Využití lesa k vyrovnaní uhlíkových emisí a jeho
udržení.

29.11.2019

Autor:

Miroslav Válka xvalka05

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Autor a zdroje informací	2
1.2	Validace	3
2	Rozbor tématu	4
2.1	Popis použitých postupů	5
2.2	Popis použitých metod/technologií	5
3	Koncepce	6
3.1	Návrh konceptuálního modelu[8, snímek 48]	6
3.2	Formy konceptuálního modelu	7
4	Architektura simulačního modelu/simulátoru	8
4.1	Mapování abstraktního modelu do simulačního[8, snímek 36]	8
5	Simulační experimenty	9
5.1	Postup	9
5.1.1	Postup pro kalibrační experimenty	9
5.1.2	Postup pro experimenty	10
5.2	Dokumentace simulačních experimentů	12
5.2.1	Kalibrační experimenty	12
5.2.2	Experimenty	13
5.3	Závěr experimentů	14
6	Shrnutí simulačních experimentů a závěr	15
7	Přílohy	17

1 Úvod

V této práci je řešena implementace lesa poutajícího uhlíkové emise z atmosféry a jeho nezbytné udržování, která je použita pro sestavení modelu[8, snímek 7] lesa a stromové školky pro obnovu lesa. Jedná se o jednu z problematik tzv. udržitelného lesního hospodářství.

Na základě modelu a simulačních experimentů[8, snímek 10] bude možné pozorovat rozdíly sekvestrace uhlíku lesem pro různé druhy stromů a zároveň schopnost stromové školky poskytovat sazenice pro omlazování lesa.

Smyslem experimentů je poukázat na možnosti České republiky pro budoucí budování lesů, které by pomohly k vyrovnávání uhlíkových emisí státu a díky tomu přispět jakožto členská země EU k naplnění cíle ujednaného v Pařížské dohodě.[1]

Pro zpracování modelu bylo nutné nastudovat materiály o uhlíkové stopě v souvislosti se stromy a lesy. Bohužel pro pochopení daných materiálů bylo nezbytné začít základy, neboť autoři materiálů již počítají s jistou znalostí v oboru.

1.1 Autor a zdroje informací

Autor této práce je Miroslav Válka (xvalka05@stud.fit.vutbr.cz). K vypracování práce byli využity zdroje a znalosti z předmětu Modelování a simulace[8,] na FIT VUT v Brně.

Pro získání faktů a informací byly použity následující zdroje: "Carbon Footprint Measurement and Management: Case Study of the School Forest Enterprise"[4], "Growing trees to sequester carbon in the UK: answers to some common questions"[2], "A life cycle greenhouse gas inventory of a tree production system"[3].

Při zpracovávání práce byli také využity autorovi poznatky z doby, kdy působil na ZŠ Újezd u Brna jako zástupce v projektu Ekoškola¹. V rámci této působnosti došlo k návštěvě lesní školky spadající pod Lesy města Brna².

Pokusil jsem se kontaktovat zástupce, kteří pracovali na publikaci "Carbon Footprint Measurement and Management: Case Study of the School Forest Enterprise"[4] spadající pod Českou zemědělskou univerzitu v Praze, bohužel neúspěšně. Dále jsem kontaktoval Lesy České republiky, s.p.³, ale pouze se omluvili, že se mi nemohou momentálně věnovat a byl jsem odkázán na jejich webové stránky, kde není nikde zmíněno, že by se české lesnictví v současné době zajímalo o uhlíkovou stopu.

¹<https://ekoskola.cz/>

²<https://www.lesymb.cz/lesni-skolky/>

³<https://lesy-cr.cz/>

1.2 Validace

Validita[8, snímek 37] byla ověřována během postupného testování a spouštění kalibračních experimentů. Výsledky kalibračních experimentů byly porovnávány s již známými výsledky uvedenými v publikacích, které byly zdrojem faktů. Ověřování validity bylo považováno za úspěšné ve chvíli, kdy se výsledky simulace[8, snímek 33] blížili hodnotám z publikací (Hodnoty nemusí sedět přesně 1:1, protože výsledky v publikacích jsou zřetězeně zaokrouhlovány). Více informací o kalibračních experimentech naleznete v kapitole Experimenty[Kapitola 5].

2 Rozbor tématu

Jedena z částí udržitelného lesního hospodářství je právě sekvestrace uhlíku (C) neboli pohlcování uhlíkových emisí z atmosféry (CO_2) a uchovávání uhlíku ve struktuře dřeva[5]. Různé druhy stromů pohlcují rozdílné množství uhlíku a mají rozdílnou životnost, proto je důležité správná volba stromů pro založení lesa, který má efektivně snižovat koncentraci skleníkových [Tabulka 1].[2]

	Divoká třešeň	Dub	Topol
Životnost [a]	45	100	25
Rozteč [m]	10,4	12,6	8
Stromů/ha	92	63	156
Uhlíku ve stromu [tC/tree]	1,54	2,86	0,66
Stromů k sekvestraci 1.1tC/a	32	38	42
Rozloha půdy k sekvestraci 1.1tC/a	0,35	0,6	0,27

Tabulka 1: Tabulka vybraných údajů o stromech z publikace[2]

Stromy během svého života projdou několika etapami při kterých se různí v lesnictví jejich přínos/podíl na uhlíkových emisích. Pro vypěstování sazenice ze semínka v stromové školce jsou generovány uhlíkové emise [4]. Ty jsou taktéž generovány při vysazování sazenic do lesa [4]. Až během růstu a stárnutí stromu dochází k zaznamenané sekvestraci uhlíku.

Překročení životnosti stromu neznamená okamžitou smrt stromu, ale pouze uvádí od kterého roku života se objevuje šance na jeho úmrtí. Tato šance není přesně daná, ale zdroj uvádí roční úmrtnost v rozsahu 3.5%–5.1% [6].

Uchovávání uhlíku ve struktuře dřeva si klade za cíl vypěstovat strom a ten následně nechat zpracovat a nahradit jiným dříve než zemře. Použitelnost mrtvých stromů je převážně jako palivo a v tom případě dojde k vrácení uzamčeného uhlíku zpět do atmosféry. Nejlepším řešením využití stromů je přepracování do výrobků nebo staveb s dlouhou životností.[5]

Výsadba stromů do lesa neprobíhá celoročně, ale jen v určitých měsících a to převážně na jaře.[4]

Pro stromové školky údaje nejsou jednotné a velmi se od sebe liší a to i v rámci různých let. Produkované uhlíkové emise pro stromovou školku v Česku s rozlohou 6900ha, produkcí sazenic 2000000 kusů je 99kgCO₂/ha[4]. Produkované uhlíkové emise pro stromovou školku ve Švédsku je v rozsahu 47 – 133kgCO₂ na 1000 sazenic, ale v USA se jedná o rozsah 29 – 40kgCO₂

na 1000 sazenic[3].

2.1 Popis použitých postupů

Pro implementaci simulačního modelu[8, snímek 44] byl vybrán jazyk C++ a to konkrétně ve standardu C++11 a simulační knihovna SIMLIB[7]. Hlavním důvodem výběru je široká podpora platforem na kterých je možné simulaci zprovoznit. Dále knihovna SIMLIB je pod licencí GNU LGPL a je možné ji využívat zdarma bez poplatků. Knihovna SIMLIB poskytuje kompletní simulační prostředí[8, snímek 38] pro diskrétní[8, snímek 32] simulaci.

2.2 Popis použitých metod/technologií

Pro kompilaci zdrojových kódů C++ je používán kompilátor g++. K řízení sestavení programu je používán GNU Make. Knihovna SIMLIB byla získána z oficiálních webových[7]. Autory této knihovny jsou Petr Peringer, David Leska a David Martinek.

3 Koncepce

3.1 Návrh konceptuálního modelu[8, snímek 48]

Do našeho modelu[8, snímek 7] zavedeme jisté abstrakce a odprostíme se od přílišně detailní reality.

V prvé řadě zjednodušíme náš pohled na stromy, neboť nás nezajímají přesné hodnoty stromů, ale zajímají nás souhrnné hodnoty celého lesa. Každý strom pro nás bude průměrným stromem, nebudeme brát v potaz, že reálné stromy mají různě velké plochy pro přijímání uhlíkových emisí a ani individuální podmínky ve kterých strom žije. Životní etapy v lese rozdělíme na tři etapy růst stromu, žití stromu a dožívání stromu, kde součet etapy růstu a žití dává dohromady životnost stromu [Kapitola 7 Přílohy: Obrázek 2, Čas růstu=Time(R), Čas žití=Time(Z)].

Zároveň všechna získaná fakta vždy operují s časovou jednotkou roky, ale ta je pro nás příliš velká a mohla by zanášet do simulace znatelné chyby zapříčiněné synchronizací procesů [Kapitola 7 Přílohy: Obrázek 2, Čas měření=Time(M)]. Z tohoto důvodu zvolíme za časovou jednotku měsíce a upravíme hodnoty faktů pro námi zvolenou časovou jednotku. Zároveň provedeme přepočty z uhlíku na uhlíkové emise [Tabulka 2].

	Divoká třešeň	Dub	Topol
CO₂eq ve stromu [tCO₂/tree]	5,6518	10,4962	2,4222
CO₂eq za rok [kgCO₂/tree/a]	125,5955556	104,962	96,888
CO₂eq za měsíc [kgCO₂/tree/a/12]	10,4662963	8,746833	8,074

Tabulka 2: Tabulka přepočítaných hodnot pro stromy

V našem modelu se nebudeme zabývat kácením stromů a jejich zpracováním, které produkuje uhlíkové emise, ale pouze jejich pěstováním. Ale i přesto budeme monitorovat počty mrtvých stromů, neboť u nich s jistotou víme, že v nich vázaný uhlík se kompletně vrátí zpět do atmosféry.

Informace o uhlíkové stopě stromové školy v Česku přepočteme na 1000 sazenic. Po přepočtu to dělá $341.55 kgCO_2$ na 1000 sazenic za rok. V porovnání jsou mezi státy příliš výrazné rozdíly. Jelikož model má ukázat možnosti pro Česko, tak budeme brát v potaz údaje české stromové školky, které si ale ještě převedeme na hodnotu pro jednu sazenici za měsíc. Na jednu sazenici nám padá $0.0284625 kgCO_2$ za měsíc.

3.2 Formy konceptuálního modelu

Pro znázornění konceptuálního modelu [8, snímek 48] byla vytvořena Petriho síť [8, snímek 61], která je rozdělena na dvě části. První část Petriho sítě [Kapitola 7 Přílohy: Obrázek 2] zobrazuje životní cyklus stromů rostoucích a žijících v lese. Druhá část Petriho sítě [Kapitola 7 Přílohy: Obrázek 1] představuje základní stromovou školku, která pěstuje a dodává sazenice stromů.

Pro výpočty kapacity stromů v lese i kapacity sazenic ve stromové školce je použit přepočít vyvíjející dostupnou rozlohu pro pěstování v hektarech a rozteče mezi stromy/sazenicemi v metrech.

$$trees[pcs] = \frac{area[ha] * 10^4}{spacing[m]^2}$$

Vztah pro převod uhlíku uloženého ve stromu na ekvivalentní množství oxidu uhličitého. [2]

$$1C = 3.67CO_2$$

4 Architektura simulačního modelu/simulátoru

4.1 Mapování abstraktního modelu do simulačního[8, snímek 36]

Simulace začíná vybráním a nastavením scénáře, který nastavuje vstupní podmínky pro simulační experimenty a také počáteční stav. Scénáře experimentů zprostředkovává jmenný prostor *scenario*. Následuje vytvoření a naplánování trojice generátorů *PlantingSeedlingsGenerator*, *PlantingTreesGenerator*, *NeedTrees*. Generátor *PlantingSeedlingsGenerator* vytváří a spouští jednou za čas rutinu pro výsadbu nových sazenic ve školce. Generátor *PlantingTreesGenerator* vytváří a spouští jednou za čas rutinu pro výsadbu nových stromů v lese z dostupných sazenic ve školce. Poslední *NeedTrees* slouží k vytváření a spouštění požadavků o stromy. Po dokončení simulace jsou vytisknuty výstupy a to buď zkráceně (Výstupy důležité pro zvolené experimenty) a nebo podrobné (Jsou vytisknuty veškeré nasbírané informace během simulace).

Implementace stromové školky byla vytvořena podle abstraktního modelu Petriho sítě stromové školky [Kapitola 7 Přílohy: Obrázek 2]. Třída *Seedling* představuje proces sazenice ve stromové školce. Vyrostlé sazenice, které jsou dostupné pro výsadbu, jsou uchovávány ve frontě *GrownSeedling*, kde čekají dokud nedojde k výsadbě do lesa nebo nedojde k jejich přestárdnutí. Jednou za čas dochází k událostem *PlantingSeedlings*, které představují cykly výsadby nových sazenic. Nově vysazené množství je vždy závislé na množství aktuálně pěstovaných a spravovaných sazenic ve školce a to tak, aby nedošlo k překročení kapacity školky.

Implementace lesa byla vytvořena podle abstraktního modelu Petriho sítě lesa [Kapitola 7 Přílohy: Obrázek 2]. Třída *Tree* představuje proces stromu v lese. Strom prochází až třemi etapami života. Tyto etapy jsou mladý les, vzrostlý les a starý les. Stromy dávají vědět okolí v jaké etapě života se nachází svojí přítomností ve frontách k tomu určeným *YoungForest*, *GrownForest*, *OldForest*. Stromy opouští les pokud umřou nebo pokud jsou vydány na požadavek o storm.

Požadavky na stromy jsou obstarávány třídou *NeedTrees* a *NeedTree*. Při příchodu požadavku na strom/stromy jsou z lesa odebírány stromy a to v pořadí od nejstaršího. Přednostně tedy odchází stromy ze starého lesa u níž existuje šance na úmrtí a následně ze vzrostlého lesa. Pokud les nemá k dispozici dostatečně starý strom pro splnění požadavku, tak odchází požadavek jako neuspokojený. Během života starých stromů ve starém lese může dojít k jejich úmrtí a uvolňují tak místo pro nové stromy.

Výsadba nových stromů probíhá jednou za čas při události výsadby *PlantingTrees*. Vysazujeme stromky dokud platí následující pravidla. Vysazujeme stromy v případě, že je dostupná jeho sazenice a zároveň v lese je volné místo pro jeho výsadbu. V opačném případě přerušujeme výsadbu.

5 Simulační experimenty

Účelem kalibračních experimentů je ověřit správnost chování simulačního modelu v rámci známých údajů z publikací.

Cílem experimentů je ukázat možnosti sekvestrace uhlíkových emisí lesem pro různé druhy stromů a poukázat nejen na různou efektivitu pohlcování uhlíkových emisí, ale i na vedlejší efekty způsobené výběrem druhu stromu a omlazováním lesa. Mezi vedlejší efekty řadíme:

- Nadbytečná/Nedostačující produkce sazenic.
- (Ne)úspěšné uzamykání uhlíku do dřevěných produktů.

5.1 Postup

5.1.1 Postup pro kalibrační experimenty

Kalibrační experimenty ověřují chování simulačního modelu po částech a jejich identifikátory mají prefix *K* následovaný číslem. Fakta z níž model vychází pochází z různých nezávislých zdrojů a proto tyto experimenty se provádí nad vstupy a výstupy brané v kontextu ke konkrétním zdrojům faktů.

- *K1, K2, K3, K4, K5, K6*
 - Cílem je ověřit správnou sekvestraci uhlíku lesem v časovém horizontu života stromů.
 - Ve výchozím stavu budeme mít plný les složený ze zvoleného druhu stromu.
 - Vstupní hodnoty pro experimenty [Tabulka 3] vychází z tabulky 2.
- *K7, K8, K9*
 - Cílem je ověřit zda strom obsahuje stejné množství uhlíku jako uvádí zdroje u stejně starých stromů.
 - Ve výchozím stavu budeme mít plný les složený ze zvoleného druhu stromu.
 - Vstupní hodnoty pro experimenty [Tabulka 3] vychází z tabulky 2.

Identifikátor	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
Druh stromu	Třešeň	Dub	Topol	Třešeň	Dub	Topol	Třešeň	Dub	Topol
Doba simulace [a]	1	1	1	10	10	10	45	100	25
Rozloha lesa [ha]	0,35	0,6	0,27	0,35	0,6	0,27	0,1	0,1	0,1
Rozteč stromů [m]	10,4	12,6	8	10,4	12,6	8	10	10	10
Rozloha školky [ha]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rozteč sazenic [m]	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabulka 3: Tabulka hlavních vstupních hodnot pro kalibrační experimenty

5.1.2 Postup pro experimenty

V experimentech si ukážeme chování pro různé druhy stromů při změně maximálního počtu odebíraných stromů za rok v časovém horizontu 300let. Odebíráním stromů uvolňujeme místo pro mladé stromky a omlazujeme les. Budeme pozorovat výsledné CO_2 , které je pro nás rozdílem mezi odebranými uhlíkovými emisemi lesem bez uhlíku uloženého v mrtvých stromech a uhlíkových emisí vyprodukovaných lesní školkou. Opakujeme experimenty dokud výsledné CO_2 nezačne klesat nebo pokud se začne opakovat s přesností na jednotky tCO_2 . Ve výchozím stavu je les z poloviny naplněn mladými stromy. Pro naše experimenty důležité vstupní hodnoty naleznete v tabulkách [Tabulka 4] [Tabulka 5].

Identifikátor	A	B	C	D	E	F
Druh stromu	Třešeň	Třešeň	Třešeň	Třešeň	Třešeň	Třešeň
Doba simulace [a]	300	300	300	300	300	300
Rozloha lesa [ha]	1	1	1	1	1	1
Rozteč stromů [m]	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4
Rozloha školky [ha]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Rozteč sazenic [m]	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Žádosti o dřevo za rok	1	1	1	1	1	1
Max. stromů v žádosti	2	3	4	5	6	7

Tabulka 4: Tabulka vstupních hodnot pro experimenty A-F

Identifikátor	G	H	I	J	K	L	L
Druh stromu	Dub	Dub	Dub	Topol	Topol	Topol	Topol
Doba simulace [a]	300	300	300	300	300	300	300
Rozloha lesa	1	1	1	1	1	1	1
Rozteč stromů [m]	12,6	12,6	12,6	8	8	8	8
Rozloha školky [ha]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Rozteč sazenic [m]	6,3	6,3	6,3	4	4	4	4
Žádosti o dřevo za rok	1	1	1	1	1	1	1
Max. stromů v žádosti	0	3	4	2	6	10	14

Tabulka 5: Tabulka vstupních hodnot pro experimenty G-M

5.2 Dokumentace simulačních experimentů

5.2.1 Kalibrační experimenty

Identifikátor	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Počet stromů	32	38	42	32	38	42
Očekávaný počet stromů	32	38	42	32	38	42
Pohlčené uhlíkové emise [kgCO ₂]	4018,94	3988,63	4069	40189	39886,3	40693
Přepočet na rok [kgCO ₂ /a]	4018,94	3988,63	4069	4019	3988,63	4069
Převod z CO ₂ na C [tC/a]	1,095	1,087	1,109	1,095	1,087	1,109
Očekávaná hodnota uhlíku [tC/a]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1

Tabulka 6: Tabulka výstupních hodnot pro kalibrační experimenty K1-K6

Identifikátor	K7	K8	K9
Počet stromů	10	10	10
Očekávaný počet stromů	10	10	10
Pohlčené uhlíkové emise [kgCO ₂]	56516,4	104964	24222
Přepočet na strom [kgCO ₂ /tree]	5651,64	10496,4	2422
Převod z CO ₂ na C [tC/tree]	1,540	2,860	0,660
Očekávaná hodnota uhlíku [tC/tree]	1,54	2,86	0,66

Tabulka 7: Tabulka výstupních hodnot pro kalibrační experimenty K7-K8

5.2.2 Experimenty

Identifikátor	A	B	C	D	E	F
Stromů v lese na konci	91	92	90	91	91	89
Pohlčené CO2 lesem [tCO2]	3399,37	3379,35	3380,97	3340,48	3209,5	2541,48
C emise školky [tCO2]	0,922185	0,922185	0,922185	0,922185	0,922185	0,922185
CO2 mrtvých stromů [tCO2]	1609,98	796,955	131,505	22,9624	0	0
Výsledné CO2 [tCO2]	1788,468	2581,473	3248,543	3316,595	3208,578	2540,558
Použitých sazenic	620	624	670	792	962	1043
Nepoužitých sazenic	112	95	15	9	0	0
Mrtvých stromů	279	139	23	4	0	0

Tabulka 8: Tabulka výstupních hodnot pro experimenty A-F

Identifikátor	G	H	I	J	K	L	M
Stromů v lese na konci	63	62	63	154	156	146	42
Pohlčené CO2 lesem [tCO2]	1902,01	1948,24	1949,81	4332,63	4170,59	3449,96	969,268
C emise školky [tCO2]	0,61479	0,61479	0,61479	1,63944	1,63944	1,63944	1,63944
CO2 mrtvých stromů [tCO2]	1345,58	0	0	1354,73	619,712	84,1311	0
Výsledné CO2 [tCO2]	555,815	1947,625	1949,195	2976,261	3549,239	3364,189	967,629
Použitých sazenic	162	322	323	1809	1836	1914	1917
Nepoužitých sazenic	207	92	93	0	0	0	0
Mrtvých stromů	126	0	0	545	249	0	0

Tabulka 9: Tabulka výstupních hodnot pro experimenty G-M

5.3 Závěr experimentů

Úspěšně bylo provedeno 22 experimentů z toho 9 kalibračních. Během kalibračních experimentů jsme ověřili věrohodnost modelu, kdy se nám výsledné hodnoty u první sady kalibračních experimentů liší jen o zaokrouhlení [Tabulka 6] a u druhé sady kalibračních experimentů došlo ke shodě [Tabulka 7]. Z toho vyplývá, že jedna ze stran (já nebo autoři publikace) počítali se zaokrouhlovací chybou.

Během dalších experimentů jsme mohli pozorovat výsledné snížení uhlíkových emisí z atmosféry [Tabulky 8 a 9], kde na tento jev má dominantní vliv nejen výběr druhu stromu, ale i vhodné omlazování lesa daného druhu stromu.

V tomto směru nám pokračování v podobném experimentování nepřinese další pro nás zajímavé výsledky, neboť experimenty zachycují stavy s nadmírou mrtvých stromů [Tabulka 8, sloupec A; Tabulka 9, sloupce G a J], ideální stav s minimem mrtvých stromů [Tabulka 4, sloupce D a E; Tabulka 9, sloupce H, K a L] a i stav přílišné poptávky po dřevu s následkem snižování stromů v lese [Tabulka 8, sloupec F; Tabulka 9, sloupec M].

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

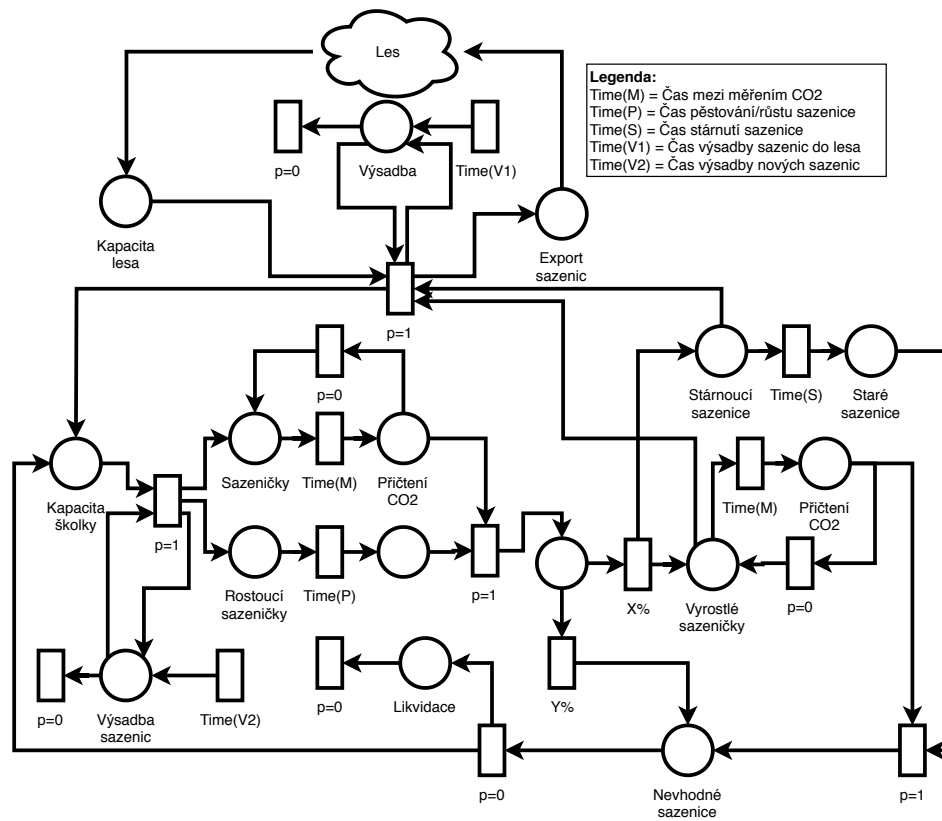
Z výsledků experimentů vyplývá, že ze zvolených stromů lépe vychází druhy stromů, které sice mají kratší životnost, ale jejich výhodou je jejich menší košatost, kdy se jich na stejně velké ploše vleze více. Ale oproti druhům stromů s dlouhou životností je nutné je ve větším počtu nahrazovat novými stromy a je tedy s nimi více práce a práce není zadarmo.

Validita modelu byla ověřena při kalibračních experimentech, kdy se výsledné hodnoty lišili oproti referenčním jen o zaokrouhlení na řád desetin tCO_2 . V rámci projektu vznikl simulační model lesa poutajícího uhlíkové emise z atmosféry a stromové školky pro obnovu lesa, který vychází ze získaných informací uvedených v kapitole Rozbor tématu a byl implementován v programovacím jazyce C++.

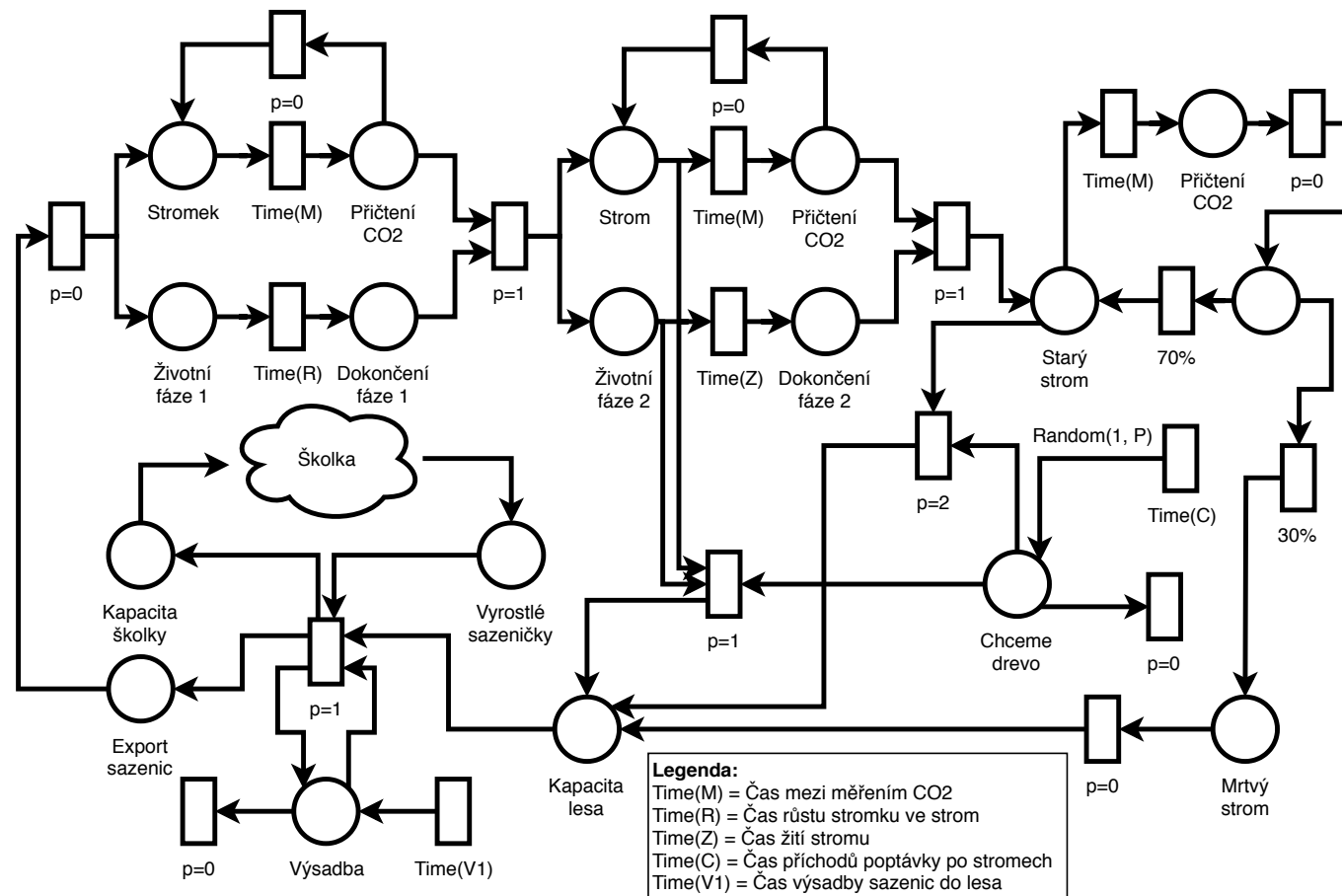
Literatura a zdroje

- [1] Baptiste Chatain, I. K.: EP podpoří snížení emisí, aby EU naplnila cíle Pařížské dohody. *European Parliament*, 04 2018, [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/press-room/20180411IPR01515/ep-podpori-snizeni-emisi-aby-eu-naplnila-cile-parizske-dohody>
- [2] Cannell, M.: Growing trees to sequester carbon in the UK: answers to some common questions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, ročník 72, č. 3, 09 1999: s. 237–247, ISSN 0015-752X, doi:10.1093/forestry/72.3.237, [cit. 2019-11-10], <http://oup.prod.sis.lan/forestry/article-pdf/72/3/237/6746169/720237.pdf>. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/forestry/72.3.237>
- [3] Kendall, A.; McPherson, E.: A life cycle greenhouse gas inventory of a tree production system. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, ročník 17, č. 4, 2012: s. 444–452, ISSN 0948-3349.
- [4] Kubova, P.; Hajek, M.; Trebicky, V.: Carbon Footprint Measurement and Management: Case Study of the School Forest Enterprise. *Biore-sources*, ročník 13, č. 2, 2018: s. 4521–4535, ISSN 1930-2126, [cit. 2019-11-10].
- [5] Kujanpää, M.; Pajula, T.; Hohenthal, C.: Carbon footprint of a forest product - Challenges of including biogenic carbon and carbon sequestration in the calculations. 262, 2009, ISBN 9789513875855, ISSN 03579387, s. 27–39.
- [6] Marritz: Is Average Tree Lifespan a Meaningful Number? [online], 06 2014, [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.deeproot.com/blog/blog-entries/is-average-tree-lifespan-a-meaningful-number>
- [7] Peringer, P.: SIMLIB/C++. [online], 2018. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>
- [8] Peringer, P.; Hrubý, M.: Slajdy k přednáškám kurzu Modelování a simulace na FIT VUT v Brně. [online], 2019, [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>

7 Přílohy



Obrázek 1: Petriho síť modelu lesa (2. část: Stromová školka)



Obrázek 2: Petriho síť modelu lesa (1. část: Les)