

# Model kůrovcové kalamity

Ivana Krumlová a Olga Krumlová

Jarní semestr 2021

## 1 Motivace

Modelujeme průběh kůrovcové kalamity ve smrkovém lese. Cílem modelu je hledat vhodnou strategii, jak jako majitel lesa s kůrovcem bojovat a maximalizovat při tom svůj zisk.

## 2 Model

Les v našem modelu je modelován jako pravoúhlá mřížka 64x32 políček, na kterých může růst smrk. Na každém smrku může žít nějaké množství kůrovců.

### 2.1 Smrky

Stromy jsou uspořádány ve čtvercové mřížce. Na každém políčku může buď růst smrk (ve vizualizaci modelu reprezentováno zeleně), nebo je prázdné, tedy tam buď opravdu není nic, nebo tam roste jiný druh dřeviny (ve vizualizaci modelu reprezentováno černě).

Na stromě může přebývat neomezené množství kůrovců. Každý strom má náhodně generovanou sílu (shora ohraničenou hodnotou 100, zespodu nastavitelným parametrem `minimal-strength`) – ve chvíli, kdy na něm je větší množství kůrovců, než je jeho síla, okamžitě umírá (ve vizualizaci tmavě hnědá).

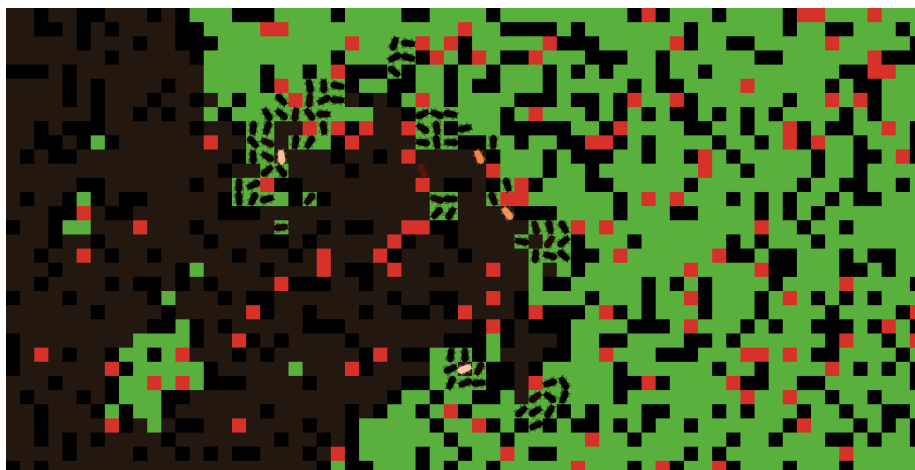
Stromy mohou být těženy. Pokácený strom je vizualizován červeně.

### 2.2 Kůrovci

Kůrovci žijí na stromech. Na začátku simulace se brouci nachází pouze na stromech v levém sloupci plochy.

V každém tiky se určitá část kůrovců přesune na některý z vedlejších stromů. Pravděpodobnost, že si kůrovec vybere konkrétní strom je dána množstvím feromonu, které vylučují kůrovci na daném stromě. Toto množství lineárně roste, dokud se nedosáhne dostatečné populace na rozmnožování. Poté lineárně klesá, protože strom je již zbytečně přeplněn.

Rozmnožování kůrovce probíhá dvakrát ročně. Na všech stromech, kde je v tu chvíli alespoň `quantity-to-be-reproduced` kůrovců, se aktuální populace



Obrázek 1: Vizualizace modelu

vynásobí konstantou **reproduction-coefficient**. Jednou ročně nastane zima a část kůrovců umírá. Před každým obdobím množení proběhne 50 tiků pohybu.

Na mrtvých stromech kůrovci přežijí, ale nemohou se zde dále rozmnožovat a nově na tyto stromy nepřelétají. V případě, že je strom pokácen člověkem, všichni kůrovci na něm ihned zemřou.

Ve vizualizaci je počet kůrovců reprezentován barvou, která postupně při rostoucím množství postupně přechází z černé do červené a případně dalších odstínů v případě velmi silně napadených stromů.

## 2.3 Kácení

Člověk se může rozhodnout, že bude některé stromy kácet.

Po každém rozmnožování se živé stromy, které mají na sobě víc kůrovců než je **cut-down-threshold** krát síla stromu, s pravděpodobností **sensitivity** pokácí. Stromy budou obarveny červeně a všichni kůrovci žijící na stromě zmizí. Ostatní stromy s pravděpodobností **specificity** necháme nepokácené.

Můžeme se také rozhodnout pro kácení sousedů nemocných stromů. V tom případě se pokácí i všechny sousední stromy káceného stromu.

## 2.4 Zisk a ztráta

Zisk počítáme jako součet cen za jednotlivé stromy.

Pokud strom přežije celou simulaci, bereme jej za zdravý strom a získáme za něj 100. Za mrtvé stromy dostaneme hodnotu nastavenou parametrem **dead-tree-price**.

Pokud se stromy rozhodneme kácet s průběhu, zisk z pokácených stromů se bude odvíjet od míry jejich napadení. Pokácením zdravého stromu, který ale nemohl dorůst do své maximální výšky, získáme **healthy-tree-price**. S větším napadením bude cena stromu lineárně klesat k zisku za mrtvý strom.

Ztráta je hodnota mezi 0 a 1 podle toho, jaký je náš zisk oproti zisku z vygenerovaného lesa v případě, že by ho kůrovci nenapadli. Kdyby náš zisk byl stejný budeme mít nulovou ztrátu. Pokud bychom měli zisk 0, bude naše ztráta mít hodnotu 1.

## 2.5 Implementace

Projekt je implementován v NetLogo. Stromy jsou reprezentovány políčky (patches), populace brouků agenty (turtles). Nejde však o úplně klasické využití agentů - každý agent reprezentuje celou populaci na konkrétním stromě, nikam se nepohybuje, jen mění barvu podle aktuálního množství kůvců na daném stromě.

## 2.6 Přehled nastavitelných parametrů

Stromy:

- **minimal-strength** – nejnižší možná síla stromu
- **density** – pravděpodobnost v procentech, že na políčku bude růst smrk
- **cut-down-threshold** – procento oslabení síly stromů, při kterém chceme strom pokácet
- **sensitivity** – pravděpodobnost v procentech, že jsme správně detekovali nemocný strom k pokácení
- **specificity** – pravděpodobnost v procentech, že jsme správně detekovali zdravý strom, který nechceme kácet
- **cut-down** – rozhodnutí, zda budeme stromy kácet
- **cut-down-neighbours** – rozhodnutí, zda budeme kácet i sousedy kácených stromů
- **healthy-tree-price** – cena za živý strom pokácený během boje s kůrovci
- **dead-tree-price** – cena za mrtvý strom

Kůrovci:

- **initial-attack** – množství kůvců na stromech napadených na začátku simulace
- **mobility** – procento kůvců, kteří během tiku změní strom
- **quantity-to-be-reproduced** – množství kůvců potřebné k namnožení
- **death-rate** – procento kůvců, kteří zemřou během zimy
- **reproduction-coefficient** – koeficient, kterým se při rozmnožování vynásobí populace na daném políčku

## 3 Analýzy

### 3.1 Nastavení pevných parametrů

Pokud nebude řečeno jinak, parametry modelu jsme nastavily tak, aby se blížily předpokládané skutečnosti, viz tabulka 1.

<code>minimal-strength</code>	65
<code>senzitivity</code>	95
<code>specificity</code>	99
<code>healthy-tree-price</code>	50
<code>dead-tree-price</code>	6
<code>initial-attack</code>	75
<code>mobility</code>	10
<code>quantity-to-be-reproduced</code>	60
<code>death-rate</code>	75
<code>reproduction-coefficient</code>	20

Tabulka 1: Nastavení parametrů

### 3.2 Bez zásahu člověka

Nejjednodušší běh modelu, který můžeme dále zkoumat, je chování lesa v případě, že do něj z pozice lesníků nebudeme nijak zasahovat (Obrázek 2).

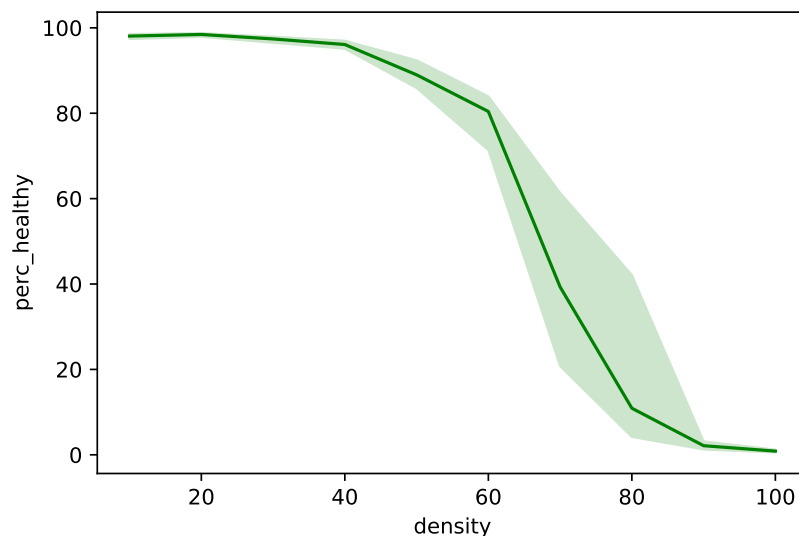
V případě, že je les smrkový porost řídký, kůrovec se v něm nedokáže dostatečně šířit a kalamita se po chvíli samovolně zastaví. Při hustotě mezi 60 a 80 % smrku odolnost lesa prudce klesá a při vyšší hustotě bez lidského zásahu již les v podstatě vymírá.

### 3.3 Kdy kácet

Naším hlavním cílem bylo zanalyzovat vliv parametru `cut-down-threshold`, tedy míry napadení kůrovcem, při které budeme strom kácet, na ztrátu zisku, a to jak v případě, že kácíme pouze stromy, které považujeme za napadené, tak i při kácení sousedů. Tuto analýzu jsme prováděly při různých hustotách lesa. Výsledky simulací jsou zachyceny v grafech 3 (výsledné počty stromů) a 4 (poměrná ztráta majitele).

Ve všech bězích modelu se ukazuje, že ztráta s monotónně roste s rostoucí hodnotou `cut-down-threshold`, tedy platí, že čím dříve začneme napadené stromy kácet, tím lépe.

V případě malé hustoty lesa (50 %) se nevyplácí kácet sousedy nakažených stromů, a to, kdy přesně začneme kácet nemá příliš velký vliv - hlavním faktorem, který brání kůrovcům v šíření je zde řídkost lesa a útok je relativně rychle zastaven i bez zásahu člověka.



Obrázek 2: Medián procenta stromů, které přežijí bez zásahu člověka v závislosti na hustotě lesa. (95 % interval spolehlivosti)

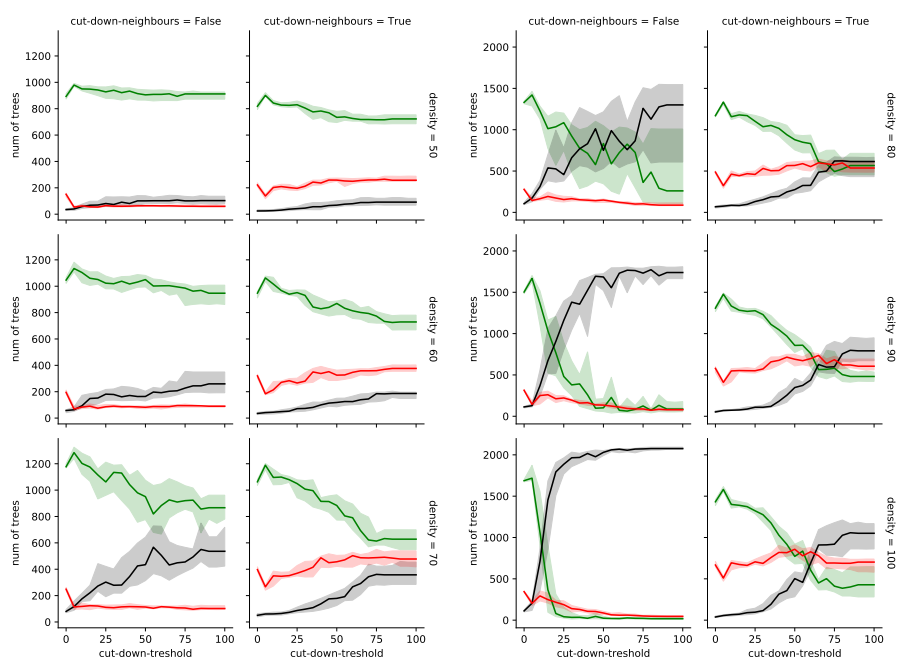
Při hustotě kolem 70 % je les stále schopen kalamitu zastavit, ale včasné kácení může dost pomoci. V případě, že začneme kácet už při nízké míře napadení, vyplatí se preventivně kácet i sousedy nakažených stromů. Od jistého bodu ale začne být mírně výhodnější kácet jen jednotlivé stromy - tak moc napadených stromů je málo, takže opravdu nakažených stromů zas tak moc nezkácíme, ale kvůli chybám při rozpoznávání nakažených jich pokácíme zbytečně mnoho.

U vyšších hustot se pak jednoznačně vyplatí kácet i sousedy napadených a vliv toho, kdy kácet začneme, je výrazný. U 100% hustoty platí, že už při nízké míře napadení (20 %) si v případě, že nebudeme kácet i sousedy, nepomůžeme a les bude z naprosté většiny zabit kůrovcem.

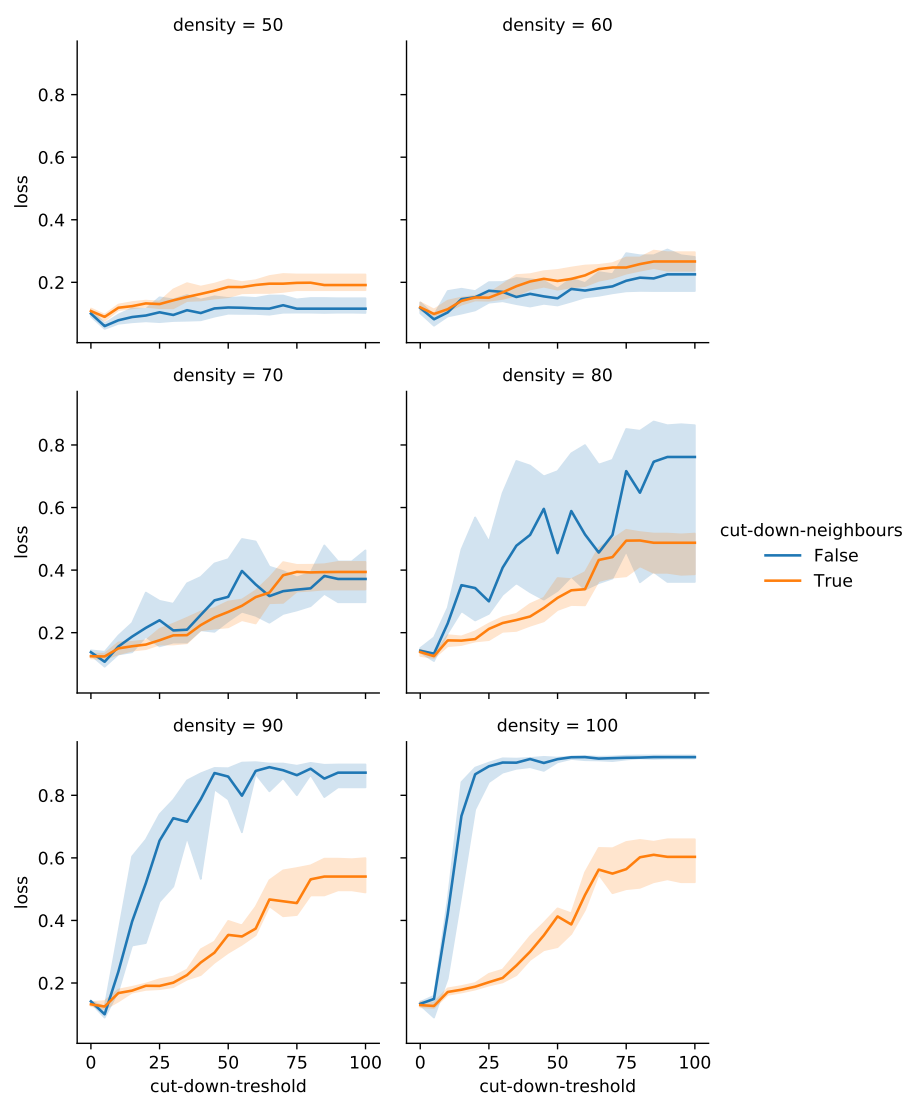
### 3.4 Jak vysazovat

Z předchozí analýzy se ukazuje, že čím dříve napadené stromy pokácíme (čím menší bude `cut-down-threshold`), tím lépe, a že čím vyšší je hustota lesa, tím dříve je potřeba začít kácet. Spodní hranice toho, kdy je vůbec možné zpozorovat, že je strom napaden, je přitom ale nejspíš pevně dána a majitel lesa nemá šanci začít s cílenou těžbou dřívě.

Smysluplnou otázkou z dlouhodobějšího hlediska tedy může být, jak hustě se vyplatí smrk v lese vůbec vysazovat, aby v případě napadení při konkrétní hodnotě `cut-down-threshold` byl maximalizován výnos. Tato závislost je znázorněna



Obrázek 3: Výsledný počet živých (zelená), zabitých (černá) a pokácených (červená) smrků v závislosti na jejich hustotě a míře kácení



Obrázek 4: Ztráta majitele lesa při různé hustotě stromů a míře kácení - medián a jeho 95% interval spolehlivosti

v grafu 5.

Pokud budeme kácet i sousedy nakažených stromů, vyplatí se při brzkém rozpoznávání nákazy (malé **cut-down-threshold**) vysazovat smrkové monokultury, výnos roste zhruba lineárně s hustotou. Při větším **cut-down-threshold** se výhoda větší hustoty postupně ztrácí a výnos je (na intervalu hustoty 50 - 100 %) zhruba konstantní, nicméně nejvýhodnější hustotou je dle měření zhruba 85 - 90 % smrkového porostu.

Zajímavější je situace bez kácení sousedů, kdy zisk nejprve roste s hustotou podobně jako při kácení sousedů, nicméně v nějakém bodě najednou začne klesat – od jisté hustoty lesa se šíření v něm stává kácením jednotlivců nekontrolovatelným. Při žádné hustotě není kácení jednotlivých stromů výrazně výhodnější než kácení i se sousedy, při malé hustotě je srovnatelné, při velké výrazně horší, jak už bylo vidět v předchozí sekci.

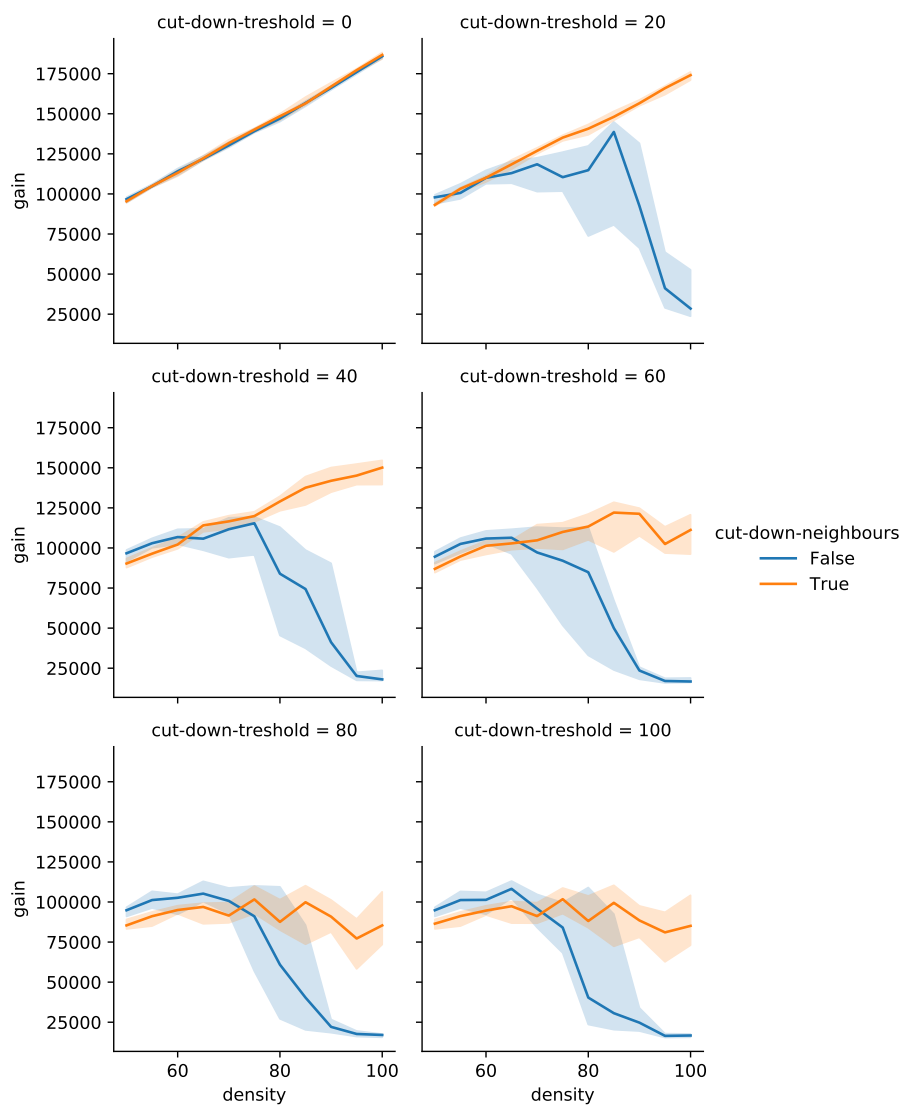
Pokud jsme schopni včas rozpoznat nákazu, vyplatí se z pohledu zisku vysazovat smrku co nejvíc. Pokud je rozpoznání nákazy těžší, podle měření to vypadá, že je ideální hustota o něco menší, než stoprocentní. Mezery mezi smrky navíc můžeme vyplnit jinou dřevinou a zisk tak ještě zvýšit, což náš model nezohledňuje.

## 4 Závěr

Ukazuje se, že strategie kácení je v našem modelovém lese poměrně jednoznačná: vyplatí se kácet co nejdříve a co nejvíc. Zároveň je velmi účinnou metodou kácení ne pouze již viditelně napadených stromů, ale i jejich sousedů, se kterým kalamitu zastavíme zpravidla výrazně rychleji.

Méně jednoznačnou se nakonec ukázala být otázka, jak hustý les vlastně vysázet, abychom v případě napadení dosáhli co nejvyššího zisku. Pokud známe vlastnosti šíření a možné strategie, jak budeme postupovat při kalamitě, může takovýto model pomoci najít optimální poměr smrku a jiných dřevin.





Obrázek 5: Zisk v závislosti na hustotě lesa při různých mírách kácení