

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: 4. B-FGG



Klimatické řízení fenologických cyklů středoevropských lesních dřevin

**Climatic forcing of phenophases of selected
centraleuropean forest species**

Martin Siegel

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Mgr. Václav Tremel, Ph.D.

Praha, 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 29. 4. 2025

Martin SIEGEL

Poděkování

Mé poděkování patří všem, díky kterým mohla tato práce vzniknout (rodině, kamarádům, spolužákům). Především však děkuji panu doc. Mgr. Václavu Tremlovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, poskytnutí vhodné literatury a vytvoření skriptu k praktické části bakalářské práce. Díky jeho obětovanému času a úsilí jsem mohl celou práci dotáhnout až do konce.

Zadání bakalářské práce

Téma

Klimatické řízení fenologických cyklů střeoevropských lesních dřevin

Anotace a cíle bakalářské práce

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem klimatických faktorů na fenologické cykly vybraných lesních dřevin střední Evropy, konkrétně buku lesního (*Fagus sylvatica*) a smrku ztepilého (*Picea abies*). Fenologické cykly, jako je například rašení listů, jsou citlivým indikátorem dopadů klimatické změny na ekosystémy.

Cílem studie je objasnit, jak změny teplotních režimů ovlivňují načasování jarní fenologické fáze (začátek rašení) u zvolených druhů dřevin na dvou geograficky kontrastních lokalitách: v Norsku (severní okraj rozšíření) a v Chorvatsku (jižní okraj rozšíření). Práce využívá dlouhodobá observační fenologická data z evropské databáze PEP725 a odpovídající meteorologická data (ERA-5).

V metodické části jsou testovány a porovnávány dva základní fenologické modely:

Model Forcing:

- Jednofázový model založený na akumulaci efektivních teplot nad určitou prahovou hodnotu (tzv. Forcing).
- Předpokládá, že k začátku fenologické fáze (rašení) dojde po nasbírání sumy pozitivních teplot od specifického počátečního dne (t_0).

Model Forcing-Chilling:

- Dvoufázový sekvenční model, který vedle akumulace pozitivních teplot (Forcing) zahrnuje i akumulaci chladných dní (Chilling), tedy záporných nebo nízkých teplot potřebných k ukončení dormance.
- Model kombinuje postupné splnění chladových a teplotních požadavků.

Oba modely byly optimalizovány na základě různých parametrů (počáteční den akumulace, prahová teplota pro Forcing i Chilling) a jejich predikční přesnost byla měřena pomocí koeficientu determinace (R^2). Práce probíhala v R-studiu za pomoci předem připraveného skriptu.

Hlavní výsledky ukazují:

- Vývoj teploty v zimních měsících výrazně ovlivňuje termín rašení v obou regionech, přičemž v jižnější lokalitě (Chorvatsko) dochází k rašení dříve než v severnější (Norsko).
- Nejvyšší predikční úspěšnost vykazoval model Forcing pro buk v Norsku ($R^2 \sim 0,81$), což ukazuje dobrou použitelnost jednoduchých modelů na základě teploty.
- Rozdíl mezi jednoduchým modelem Forcing a složitějším Forcing-Chilling byl obecně malý; významnější přínos dvoufázového modelu se projevil pouze u smrku v Chorvatsku.
- Lze očekávat, že při pokračujícím oteplování významně poroste význam fotoperiody a dalších faktorů, zejména v oblastech, kde v zimě nebude dosaženo potřebného Chillingu.

Datum zadání: 14.10.2023

Student: Martin Siegel

Vedoucí práce: doc. Mgr. Václav Tremel, Ph.D.

Abstrakt

Klimatické změny mají významný vliv na fenologické cykly dřevin, což vyvolává zájem o jejich přesnější monitorování a řízení. Tato bakalářská práce se zaměřuje na faktory řídící cykly vybraných druhů stromů, jako jsou buk lesní (*Fagus sylvatica*) či smrk ztepilý (*Picea abies*), v kontextu měnících se klimatických podmínek. Práce se zabývá také různými druhy modelů umožňujícími predikovat fenologické fáze. Metodická část se věnuje aplikaci modelu Forcing a Forcing-Chilling pro predikci rašení listů. Rašení listů je důležitá fenologická fáze, která vymezuje počátek fotosyntézy.

Výsledky naznačují, že vývoj zimní teploty má významný vliv na začátek vegetační sezóny, zejména v jižní Evropě. V severní Evropě mají na nástup rašení vliv až vyšší teploty na začátku jara. Model Forcing nejlépe predikuje rašení pro buk v Norsku. Rozdíl mezi modelem Forcing a Forcing-Chilling je téměř zanedbatelný, s výjimkou smrku v Chorvatsku. Dá se očekávat, že vyšší teploty v budoucnu povedou k dřívějšímu rašení, na druhou stranu absence Chilling teploty bude vyžadovat větší nároky na Forcing teplotu. Výsledky této bakalářské práce ukazují na základě meteorologických dat solidní predikční schopnost modelů rašení listů a jehlic.

Klíčová slova: fenologická fáze, fenologické modely, změna klimatu, fenologická databáze, bioklimatologie, fenologie, klimatické změny, lesní dřeviny, Evropa, monitorování, fotoperioda, Chilling, Forcing

Abstract

Climate change has a significant impact on the phenological cycles of tree species, which raises interest in their accurate monitoring and prediction. This bachelor's thesis focuses on the factors controlling the phenological cycles of selected tree species, such as European beech (*Fagus sylvatica*) or Norway spruce (*Picea abies*), in the context of changing climatic conditions. The thesis also deals with several types of models that allow predicting phenological phases. The methodological part is devoted to the application of the Forcing and Forcing-Chilling models for predicting bud burst. The bud burst is an important phenological phase that defines the beginning of photosynthesis.

The results indicate that the winter temperature has a significant impact on the timing of bud burst, especially in southern Europe. In northern Europe, the onset of bud burst is influenced by higher temperatures in early spring. The Forcing model best predicts bud burst for beech in Norway. The difference between the Forcing and Forcing-Chilling models is almost negligible, except for spruce in Croatia. It can be expected that higher temperatures in the future will lead to earlier bud burst, on the other hand, the absence of Chilling temperature will require greater demands on Forcing temperature. This bachelor thesis showed a superior performance of models predicting bud burst based on meteorological data.

Keywords: Phenological Phase, Phenological Models, Climate Change, Phenological Database, Bioclimatology, Phenology, Climate Changes, Forest Trees, Europe, Monitoring, Photoperiod, Chilling, Forcing

Obsah

1. Úvod a cíle	12
2. Fenologie	14
2.1. Význam fenologie	14
2.2. Fenologie v éře klimatické změny	14
2.3. Přehled fenologických fází v temperátním pásu	15
2.4. Fenofáze buku lesního a smrku ztepilého	18
2.5. Fenologická služba ČHMÚ	19
2.6. Faktory řídící fenologické fáze	20
2.6.1. Rozdělení rostlin podle požadavků na teplotu	20
2.6.2. Rozdělení rostlin podle požadavků na délku dne.....	21
2.6.3. Šířkový gradient a fotoperioda.....	22
2.6.4. Vliv půdní vlhkosti na fenologii rostlin	24
3. Predikování fenofází pomocí environmentálních dat	25
3.1. Základní typy fenologických modelů	25
3.2. Tabulka modelů predikující fenologické fáze	26
4. Metodika	44
4.1. Studovaná oblast	44
4.2. Fenologická databáze	46
4.3. Klimatická data	47
4. 4. Použité fenologické modely.....	47
5. Výsledky.....	50
5. 1. Pozorované počátky rašení.....	50

5.2. Modely počátku rašení	52
5.3. Nejlepší predikce modelů	58
6. Diskuse.....	60
6.1. Diskuse výsledků	60
6.2. Nejistoty.....	62
7. Závěr	64
8. Zdroje.....	65
8.1. Zdroje dat.....	65
8.2. Seznam použité literatury.....	65
9. Přílohy.....	73
9.1. Tabulka zobrazující výsledky aplikace modelů Forcing a Forcing-Chilling při různých parametrech	73
9.2. R Skripty Forcing a Forcing-Chilling	84

Seznam obrázků

Obrázek 1: Příklad jarních fenologických fází u třešně ptačí	17
Obrázek 2: Fenologické fáze kukuřice	20
Obrázek 3: Délka dne v průběhu roku v různých zeměpisných šířkách severní polokoule	23
Obrázek 4: Graf srovnání teploty v Norsku a Chorvatsku	45
Obrázek 5: Graf srovnání délky dne v Norsku a Chorvatsku	45
Obrázek 6: Pozorovaná data začátku rašení pro oba druhy a obě lokality	50
Obrázek 7: Vysvětlená variabilita modelu Forcing v závislosti na prahové teplotě a počátečním datu akumulace teploty.....	52
Obrázek 8: Vysvětlená variabilita modelu Forcing-Chilling v závislosti na prahových teplotách a počátku období akumulace pro severní lokalitu	54

Obrázek 9: Vysvětlená variabilita modelu Forcing-Chilling v závislosti na prahových teplotách a počátku období akumulace pro jižní lokalitu	56
Obrázek 10: Přehled nejspolehlivějších predikcí	58

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled studií využívající modely k predikci fenologických fází rostlin	28
Tabulka 2: Fitované hodnoty parametrů určené k výzkumu	49
Tabulka 3: Přehled parametrů predikcí s nejvyšším R ²	59

Seznam zkratk

AAT – Active Accumulated Temperature (aktivní akumulovaná teplota)
AIC – Akaike Information Criterion (odhad chyby predikce)
BBCH – Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt
CDD – Chilling Degree Day (chladné denostupně)
CIHS – Chilling Influenced Heat Sum (model ovlivněný chladem a teplem)
ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav
DAM – Dormancy-Associated Mads-box
DOY – Day Of Year (den v roce)
ECMF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
GAM – General Additive Model (zobecněný aditivní model)
GDD – Growing Degree Day (teplé denostupně)
ICP – International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (Mezinárodní koordinační program pro hodnocení a monitoring vlivů znečištění ovzduší na lesy)
LMM – Linear Mixed Model (lineární smíšený model)

MBE – Mean Bias Error (průměrná chyba posunu)

MRE– Mean Relative Error (průměrná relativní chyba)

NPN – National Phenological Network (Národní fenologická síť)

NSE – Nash-Sutcliffe Efficiency (koeficient efektivity modelu)

PTT – Photo-Temperature Timed model (fototermální časový model)

RMSE-Root Mean Square Error

SIAM – Spring-Influenced Autumn phenology Model

SOS – Start Of Season

t0 – Start Day, začátek akumulace Forcing teploty

Tbase – Prahová teplota pro Forcing

Tcbase – Prahová teplota pro Chilling

TDLT – Temperature Day Length Tresh model (model fotoperiodického a teplotního prahu)

TPM –Temperature and Photoperiod Multiplicative Model

1. Úvod a cíle

Na Zemi dochází v posledních desetiletích k pozorovatelným změnám klimatu. Teploty jsou vyšší než dříve a dochází k častějším projevům extrémního počasí, jako je například sucho nebo vlny veder (IPCC, 2023). Tato skutečnost má významný dopad na část životních cyklů živých organismů, kteří se musejí přizpůsobovat novému chodu počasí, případně i novému prostředí (Anderson, Song, 2020).

Na základě toho, jak se v průběhu roku či dne mění intenzita dopadajícího slunečního záření, a tím i teplota a vlhkost vzduchu, tak se odvíjí cykly rostlin a živočichů (Larcher, 1988). Existují období, která jsou příznivá či nepříznivá pro různé životní aktivity.

Také rostliny mají svůj denní a sezónní cyklus, který je přizpůsoben jejich potřebám. V rámci diurnálního cyklu většina stromů temperátní zóny roste hlavně v noci, kdy jsou vodivá pletiva naplněna vodou, jejíž tlak indukuje růst a dělení buněk dřeva (Zweifel et al., 2021). Tento denní rytmus růstu je řízen zejména fyzikálně. Sezónní změny, jako je například opadávání listů na podzim, jsou zase reakcí na změny povětrnostních podmínek v průběhu roku. Tyto cyklické změny v růstu a vývoji rostlin jsou důležitou součástí jejich přizpůsobení se prostředí.

Fenologický cyklus rostlin je úzce propojen s cyklem uhlíku. Cyklická produkce rostlinné biomasy během vegetační sezóny je základem pro koloběh uhlíku v ekosystémech (Knorr et al., 2010). Množství vyprodukované biomasy se liší v závislosti na typu biotopu – nejvyšší produkce je v tropických deštných lesích a mokřadech, nejnižší v tundře a pouštích. V mírném pásu se roční produkce biomasy pohybuje kolem 1200 g na 1 m² (Larcher, 1988).

Změna klimatu a prodlužování vegetační sezóny vede ke zvýšení produktivity biomasy (Poudel et al., 2011), přičemž část této biomasy, tzv. rostlinná nekromasa (spadané listí, jehličí, uschlá vegetace), tvoří na povrchu půdy vrstvu opadu (horizont opadu). Opad se postupně rozkládá a vzniká vrstva humusu, který uvolňuje živiny přijímané kořeny rostlin (Knorr et al., 2010). Tímto způsobem se uhlík fixovaný fotosyntézou dostává do půdy a může být dále využit v rámci koloběhu uhlíku. Studie Krinner et al., (2005) ukázala, že v důsledku prodloužení vegetační sezóny o 1 den dochází ke zvýšení čisté primární produkce o 1,2 g C/m² v

Evropě. Podobně studie (Piao et al., 2007) zjistila, že posun fenologických fází o 1 den vede ke zvýšení ročního úhrnu čisté primární produkce o 2,6 g C/m² v listnatých lesích.

Tyto studie potvrzují, že změna fenologie rostlin v důsledku změny klimatu, má významný dopad na koloběh uhlíku v ekosystémech. Nedávné výzkumy nicméně naznačují, že toto tvrzení platí jen v oblastech s dostatkem vody, v suchých oblastech vlivem vodního stresu naopak delší vegetační sezóna snižuje produktivitu biomasy (He, 2023)

Z hlediska zapojení vegetace do cyklu uhlíku je nejdůležitější fenologickou fází rašení listů, které vymezuje počátek intenzivní fotosyntézy ve vegetační sezóně (Larcher, 1988). V rámci bakalářské práce se proto zaměřuji na tuto fenologickou fázi.

První část bakalářské práce se věnuje rešerši, popisující vliv klimatu na fenologické cykly dřevin. Druhá část testuje dva fenologické modely, Forcing a Forcing-Chilling, predikující rašení pupenů u smrku ztepilého (*Picea abies*) a buku lesního (*Fagus sylvatica*) na dvou lokalitách, které představují severní a jižní areál rozšíření těchto dřevin. Severní lokalita se nachází v Norsku na 60°16' severní šířky a 5°21' východní délky v nadmořské výšce cca 50 m v obci Fanahammaren, jenž je součástí města Bergen. Naproti tomu jižní lokalita je situována v Chorvatsku na 45°36' severní šířce a 17°10' východní délce v nadmořské výšce 160 m ve městě Daruvar.

Důvod pro vybrání těchto dvou lokalit, které jsou od sebe vzdálené 15° z.š. je ten, že v průběhu roku je v těchto lokalitách odlišná fotoperioda (délka dne). Zatímco v Chorvatsku se světlý den pohybuje od 9 v zimě do 15 hodin v létě, tak v Norsku je roční rozpětí mnohem větší. Zimní den netrvá ani 6 hodin a letní má až 19 hodin. Tato skutečnost může mít určitý vliv na průběh a načasování fenologických fází. Další vliv má průběh teploty zejména v druhé polovině zimy. Tyto nejasné vlivy je tedy možno stále studovat.

Cílem je otestovat schopnost dvou fenologických modelů (Forcing) a (Forcing-Chilling) a předpovídat fázi rašení na buku a smrku v Norsku a Chorvatsku s využitím dat pozorovaných skutečných rašení během období cca 1960-2015 a dat z meteorologických pozorování.

2. Fenologie

2.1. Význam fenologie

Vegetační sezóna označuje období, kdy na daném místě panují podmínky umožňující růst a reprodukci vegetace. Naopak vegetační klid (dormance) je doba, kdy nepříznivé abiotické podmínky, jako jsou nízké teploty nebo nedostatek vody, udržují vegetaci v klidovém stavu (Sklenář, 2008). Fenologie je vědní disciplína, která se zabývá studiem časového průběhu periodicky se opakujících životních projevů, (tzv. fenologických fází) rostlin a živočichů v závislosti na podmínkách vnějšího prostředí (Hájková et al., 2012). Fenologická fáze (zkráceně fenofáze) je určitý vývojový stupeň rostliny, který se opakuje každoročně (Hájková et al., 2012).

Rostliny mohou v rámci klimatu dané oblasti vykazovat různé sezónní vzorce aktivity. Délka vegetační sezóny není na jedné lokalitě nikdy zcela konstantní. Může se výrazně lišit jak mezi jednotlivými druhy, tak i rok od roku podle převládajícího počasí daného roku (Hájková et al., 2012).

2.2. Fenologie v éře klimatické změny

Na základě fenologických pozorování lze doložit, že v posledních desítkách let dochází vlivem změny klimatu i ke změnám ve fenologických cyklech. Vlivem vyšší teploty, rostliny dříve raší a později přechází do vegetačního klidu (Zohner et al., 2023), nicméně s brzkým rašením se pojí riziko, že zejména kvetoucí stromy mohou být na jaře poškozeny pozdním mrazem, jehož frekvence i přes globální oteplování zůstává vysoká (Zohner et al., 2020). Například v roce 2024 došlo k rozsáhlému poškození plodů ovocných stromů, vinic i již vzešlé zeleniny. Mrazy, které v druhé polovině dubna sužovaly zejména Čechy, nebyly na tuto dobu neslýchané. Problémem ale byla o více než 30 dní od průměru urychlená vegetace v důsledku rekordně teplého února, března a začátku dubna (Dlouhodobé řady, Fenofáze 2024).

Brzký nástup jara a vysoké teploty v zimě a na jaře, zvyšují riziko výskytu půdního sucha v Česku (Karamuz, 2021). Nedostatek srážek a vysoké teploty vedou k rychlému vysychání půdy, které může nastat již na začátku vegetační sezóny. Zejména, pokud není během zimy dostatek sněhu. Dřívější rašení a růst rostlin znamená vyšší odběr vody kořenovými systémy a zvýšený výpar, což dále přispívá k vyčerpání půdní vlhkosti (Potopová, 2016). Delší vegetační sezóna spojená s vysokými teplotami tak může vést k suchu později

v létě. Letní sucho může poškodit vegetaci, způsobit předčasný opad listů a ovlivnit podzimní fenologii rostlin (Wu et al., 2022).

Fenologie má zásadní význam v ročním cyklu vody, jelikož během vegetační sezóny vegetace odebírá více vody z půdy a dochází k intercepci srážek na listech, což ztěžuje pronikání vody do půdy. Naopak v zimě při nízké intercepci a díky minimální transpiraci voda snáze proniká do půdy a může doplňovat zásoby podzemní vody (Potopová, 2016). Delší vegetační sezóna tedy zkracuje období pro doplnění podzemních zásob vody.

2.3. Přehled fenologických fází v temperátním pásu

Během roku lze vymezit několik fenologických období, která jsou dána střídáním vegetativní aktivity a klidu (dormance) v důsledku změn ročních období (Larcher, 1988). Již během podzimu se rostliny připravují na zimní klid a tzv. předdopodpočinkové období začíná v pupenech ještě před opadem listů a je vyvoláno změnou délky dne a nízkou noční teplotou (Larcher, 1988). Následuje vlastní období dormance, které se dělí na ektodormanci a endodormanci (Larcher, 1988). V této fázi jsou pupeny spící. Listnaté stromy, jako je dub a buk, si v zimě ponechávají suché listy z předchozího roku, které opadají až na jaře v době rašení nových listů. Tomuto jevu se říká marcescence (Heberling et al., 2023).

Rostliny v mírném pásmu procházejí během zimy několika fyziologickými fázemi, které jsou nezbytné pro jejich přežití a správný vývoj v následujícím roce. Nejprve vstupují do stavu endodormance, kdy pupeny nejsou schopny růst ani za příznivých podmínek. Tento stav je řízen fotoperiodicky a zajišťuje, že rostlina nereaguje na krátkodobé oteplení uprostřed zimy (Larcher, 1988). Endodormance je ukončena až po delším působení nízkých teplot, obvykle v rozmezí 6-9 °C po dobu minimálně 6 týdnů.

Poté následuje fáze poodpočinku (Chilling), kdy rostlina potřebuje ještě nižší teploty, aby mohla přejít do období vegetativní aktivity. V našich podmínkách trvá poodpočinek obvykle do února. Teprve po skončení poodpočinku může rostlina za příznivých podmínek (dostatečná teplota vzduchu a půdy) začít rašit, kvést a klíčit (Larcher, 1988). Vegetační zimou se rozumí období s průměrnými denními teplotami 0 °C a nižšími. Tyto fyziologické fáze jsou řízeny komplexně na molekulární úrovni, především geny DAM (Dormancy-Associated Mads-

box), které jsou exprimovány v pupenech hlavně v zimním období a jejichž hladiny jsou ovlivněny fotoperiodickými a teplotními signály (Kolář, 2006).

Fenologické jaro začíná vegetačním předjařím, kdy průměrné denní teploty dosahují 0-5 °C (Hájková et al., 2012). V této době již kvetou časně jarní byliny, jako jsou sněženky, devětsily nebo podběly. Jedná se o rostliny, které mají tzv. jarní aspekt, což znamená, že kvetou brzy na jaře v době, kdy je nestíní listí na stromech. Tyto jarní druhy musí stihnout odkvést velmi brzy, než se listnaté stromy olistí a zastíní je. Počátek vegetačního jara nastává při průměrných denních teplotách nad 5 °C, což se obvykle děje na začátku března. Toto období se vyznačuje zvětšováním a otevíráním pupenů (tzv. "budburst" = rašení), což je první fenologická fáze v roce. Před olistěním ostatních dřevin kvetou např. druhy, jako je líska, vrba jíva, zlatnice obecná nebo meruňka (Hájková et al., 2012). Poslední zmiňovaná meruňka je často zmiňovaná pro svou náchylnost na jarní mrazy. Takzvaný frost day risk uvádí počet dní od rašení až do dne, kdy bývá zaznamenán nejpozdější jarní mráz (Rigby, 2008). Tyto dny jsou u nás v Česku známé jako zmrzlí muži (Pankrác, Servác, Bonifác) v polovině května.

S postupem jara raší, olistují se a kvetou další stromy jako třešně, hrušně, jabloně, šeříky, duby, buky a břízy. Fenologické fáze kvetení a rašení nastávají pro různé druhy v odlišný čas, který je dán různými požadavky na akumulovanou teplotu (Larcher, 1988). Při fenologických pozorováních se rozlišují různé fáze olistování a kvetení v poměru k celé dřevině (10 %, 50 %, 100 %), viz například kvetení ptačí třešně (Obrázek 1). Druhá část fenologického jara odpovídá hlavnímu vegetačnímu období s průměrnou denní teplotou nad 10 °C (Hájková et al., 2012). Nazývá se též plné jaro. Fenofáze můžeme rozdělit na vegetativní (začátek olistování, iniciační rašení) nebo generativní (butonizace, kvetení, odkvět, zralost plodů) (Hájková et al., 2012).



Obrázek 1: Příklad jarních fenologických fází u třešně ptačí (zdroj: Bound et al., 2022)

Vegetační léto je období s průměrnými denními teplotami vzduchu 15 °C a vyšší (Hájková et al., 2012). Mezi letní fenologické fáze, které se sledují, patří kvetení, vývoj a zrání plodů a semen, růst pletiv (mírně ustává během léta), ukončení růstu letorostů, tvorba pupenů, janské výhony, dřevnatění výhonů (Hájková et al., 2012). Vegetační léto můžeme rozdělit na časný, plný a pozdní. Během časného léta kvete bez černý, akát nebo lípa. Zároveň již zraje třešně (Hájková et al., 2012). V plném létě dozrává angrešt a časný švestky, kvete vinná réva. V pozdním létě dozrávají hrušně a jabloně (Hájková et al., 2012).

Vegetační podzim je období s průměrnými denními teplotami od 15 °C do 5 °C. Dělí se na časný, plný a pozdní (Hájková et al., 2012). Během časného podzimu stále dozrávají jabloně a také plody dubu zimního. Během plného podzimu žlutne listí většiny dřevin. Během pozdního podzimu nastává vegetační předzima, což je období s průměrnými denními teplotami od 5 °C do 0 °C (Atlas podnebí Česka, 2015). V tuto dobu opadáva listí ze stromů. Při ještě nižších teplotách následuje fenologická zima, která je obdobím vegetačního klidu (Hájková et al., 2012).

2.4. Fenofáze buku lesního a smrku ztepilého

Fenologické cykly lesních dřevin ve střední Evropě vykazují určitá specifika, která jsou výsledkem interakce mezi klimatickými podmínkami a biologickými vlastnostmi jednotlivých druhů. Mezi střeoevropské lesní dřeviny patří buk lesní (*Fagus sylvatica*) a smrk ztepilý (*Picea abies*).

Buk lesní (*Fagus sylvatica*): Je významnou lesní dřevinou střední Evropy, přičemž jeho fenologický cyklus začíná rašením na jaře, obvykle v dubnu, a kvetením v květnu. Plody dozrávají na podzim. Listí opadá většinou v listopadu. Jednotlivé sledované fáze jsou rozděleny během roku takto (Hájková et al., 2012):

- 1. Rašení pupenů (10 %)**
- 2. První listy (10, 50, 100 %)**
- 3. Plné olistění (100 %)**
- 4. Počátek kvetení (10, 50, 100 %)**
- 5. Konec kvetení (100 %)**
- 6. Tvorba pupenů (10 %)**
- 7. Počátek fruktifikace, tvorba plodů (10 %)**
- 8. Zrání plodů (10 %)**
- 9. Žloutnutí plodů (10, 100 %)**
- 10. Opad listů (10, 100 %)**

V době rašení se teplota pohybuje mezi 7,7 a 8,9 °C, během kvetení mezi 10, 7 a 13,5 °C a v době opadu listů mezi 4,3 a 5,4 °C. Interval od rašení do prvních listů je mezi 14 až 20 dny, od prvních listů po opad listů mezi 160 až 195 dny (Hájková et al., 2012). Buk lesní je citlivý na změny teploty, především jarní mrazíky mohou poškodit mladé listy a květy (Kubát et al., 2002).

Smrk ztepilý (*Picea abies*): Smrk je jehličnatá dřevina, která raší brzy na jaře, přičemž kvetení probíhá v květnu a červnu, šišky dozrávají následující rok. Sledované fenologické fáze jsou rozděleny v průběhu roku takto (Hájková et al., 2012):

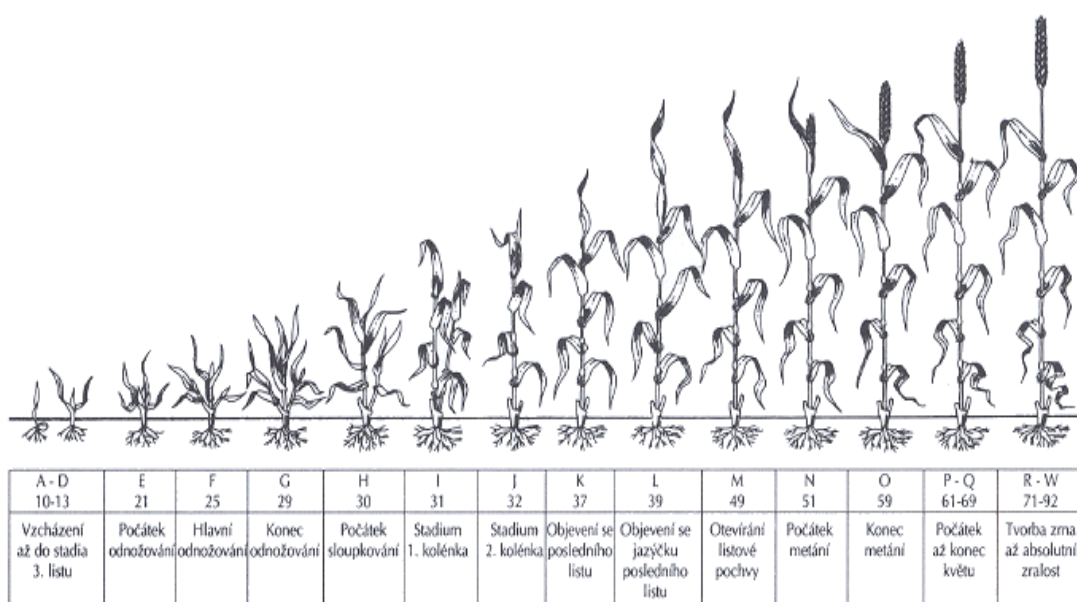
1. Rašení pupenů
2. První jehlice (10, 50, 100 %)
3. Růst výhonů
4. Kvetení (samčí a samičí květy 10, 50, 100 %)
5. Butonizace (10 %)
6. Opad pylu
7. Vývoj šišek (zrání semen)
8. Opylení
9. Opad jehlic (u starších, dolních větví)
10. Ukončení růstu, příprava na dormanci

Průměrná teplota vzduchu u rašení se pohybuje mezi 9 až 12°C. Během kvetení mezi 11,9 a 15,4 °C. Kvetení trvá 15 až 17 dní. (Hájková et al., 2012). Smrk je citlivý na klimatické změny, zejména na sucha a vysoké teploty, což může vést k jeho oslabení a napadení škůdci (Seidl et al., 2017).

2.5. Fenologická služba ČHMÚ

Fenologická služba je nedílnou součástí Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) od roku 1939 (Hájková et al., 2012). V roce 1983 došlo k výrazné změně fenologických pozorování, kdy byla pozorovací místa rozdělena na stanice sledující polní plodiny a ovocné dřeviny. O čtyři roky později, v roce 1987, se vyčlenily také lesní fenologické stanice (Hájková et al., 2012). Tato rozsáhlá transformace zahrnovala mimo jiné i změnu charakteru popisovaných fenologických fází.

ČHMÚ je zapojen do evropského fenologického systému. Kvůli nutnosti sjednotit pojmové názvosloví pro porozumění mezi různorodými národními metodikami byla zvolena škála BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and CHemical industry), vycházející z kódování obilovin ZADOKS (1974) (Kubíková et al. 2019). Tato stupnice je zpracována ve 4 jazycích (angličtina, němčina, francouzština a španělština) a obsahuje rozsáhlé grafické přílohy schematicky znázorňující jednotlivé fáze vegetativního a generativního vývoje rostlin (Meier, 1997). BBCH je standardizovaná stupnice vývojových a růstových stádií rostlin zaznamenané pomocí kódu, jež se používá v Evropské unii (Kubíková et al., 2019). Existuje obecná stupnice BBCH (obrázek 1) a pak samostatné stupnice pro různé typy rostlin. Například existuje stupnice pro vývoj kukuřice (obrázek 2).



Obrázek 2: Fenologické fáze kukuřice (zdroj: Neudert et al., 2023)

2.6. Faktory řídící fenologické fáze

2.6.1. Rozdělení rostlin podle požadavků na teplotu

Teplota vzduchu a půdy má zásadní vliv na načasování fenologických fází rostlin. Každý druh má specifické nároky na teplo pro jednotlivé životní pochody a vyžaduje určité teplotní optimum (Bartošová, 2024). Obecně platí, že pro otevírání pupenů a kvetení většiny rostlin v mírném pásu je potřeba teplota 6-10 °C (Larcher, 1988). Rostliny horské nebo kvetoucí na jaře obvykle stačí nižší teplota 0-6 °C, zatímco druhy kvetoucí později vyžadují vyšší teploty. Některé

druhy jako topoly, břízy a jehličnany raší již při teplotě těsně nad 0°C. Naopak pro klíčení potřebují různé rostliny odlišnou teplotu – některým svědčí nízké teploty, ale většina vyžaduje nejprve dlouhé chladné období (jarovizace) a teprve poté jsou schopny vyklíčit (Hess, 1983).

Většina rostlin vykazuje optimální teplotu fotosyntézy v rozmezí 10–34 °C, přičemž maximum je často mezi 25–30 °C. Pod 10 °C a nad 34 °C dochází k aktivaci ochranných mechanismů a rychlému poklesu asimilace CO₂, protože listy jsou ve stresu (Cornic, 2025). Průměrná optimální teplota fotosyntézy pro globální vegetaci je okolo 18,8 °C (±7,9 °C). Nejvyšší hodnoty (až 30 °C) se vyskytují v tropech, nejnižší (kolem 5 °C) ve vysokých zeměpisných šířkách a horských oblastech (Shi et al., 2025). Rostliny jsou schopny se aklimatizovat, například u jednoho druhu keře v poušti se optimum mění v průběhu roku od 29 °C na jaře, přes 41 °C v létě až po 28 °C na podzim (Cornic, 2025). U arktických rostlin je optimum mezi 8–15 °C, u pouštních až kolem 45 °C (Cornic, 2025).

Kořeny dřevin v mírném pásmu mohou růst i při velmi nízkých teplotách půdy, konkrétně byl prokázán růst i při teplotách půdy pod 3 °C a v některých experimentech dokonce při průměrné půdní teplotě kolem 2,7 °C (Marchand et al., 2025). Prýty (nadzemní části, tj. stonky) naopak ukončují svůj růst, když průměrná teplota vzduchu klesá k 12–17 °C; růst stonkového dřeva obvykle ustává při poklesu denních teplot pod cca 12 °C (Marchand et al., 2025). Plody a semena ke zrání potřebují více tepla než vegetativní části. Optimální, minimální a maximální teploty se mohou od geneticky fixované normy posunout při adaptaci rostlin k podmínkám prostředí. (Larcher, 1988).

V současnosti představuje problém zvyšování teplot během zimy, kdy druhy dříve spokojené s nízkou teplotou pro rašení, se stávají náchylnější k poškození jarními mrazy (Zohner et al., 2020).

2.6.2. Rozdělení rostlin podle požadavků na délku dne

Jednotlivé druhy rostlin se vyznačují rozdílnými nároky na délku a intenzitu světla. Vyšší nároky jsou zpravidla spojeny i s větší odolností vůči teplotním výkyvům (průběhu dne i roku). Tyto dřeviny se označují jako slunné, z vybraných dřevin je to například bříza. Naopak nižší nároky na světlo mají druhy stinné, přechodné typy jsou polostinné či poloslunné (Hess, 1983). Nároky rostliny záleží ale také na vývojové a fenologické fázi. Rostliny mají schopnost rozpoznat délku dne a noci a reagovat na její změny v průběhu roku. Tato schopnost se nazývá

fotoperiodismus a je důležitým faktorem pro nástup jednotlivých fenologických fází rostlin (Larcher, 1988). Fotoperiodismus je běžný pro rostliny v oblastech, kde se mění podmínky v průběhu roku, a proto je nutné vývojové etapy rostliny správně načasovat. Rostliny v tropech jsou nicméně velmi citlivé i na změnu fotoperiody o pouhých 10 minut (Larcher, 1988)

Rostliny lze podle požadavků na délku dne či noci pro kvetení rozlišit na tři základní skupiny:

Dlouhodenní rostliny: Tyto rostliny vyžadují pro kvetení délku osvětlení delší než kritická délka dne, která je druhově specifická a zpravidla leží mezi 10 a 14 hodinami (Hess, 1983). Dlouhodenní rostliny jsou typické pro vyšší zeměpisné šířky.

Krátkodenní rostliny: U těchto rostlin je naopak pro kvetení nutná délka dne kratší než kritická délka. Krátkodenní rostliny se vyskytují převážně v tropech, pokud nejsou zcela neutrální vůči délce dne (Hess, 1983).

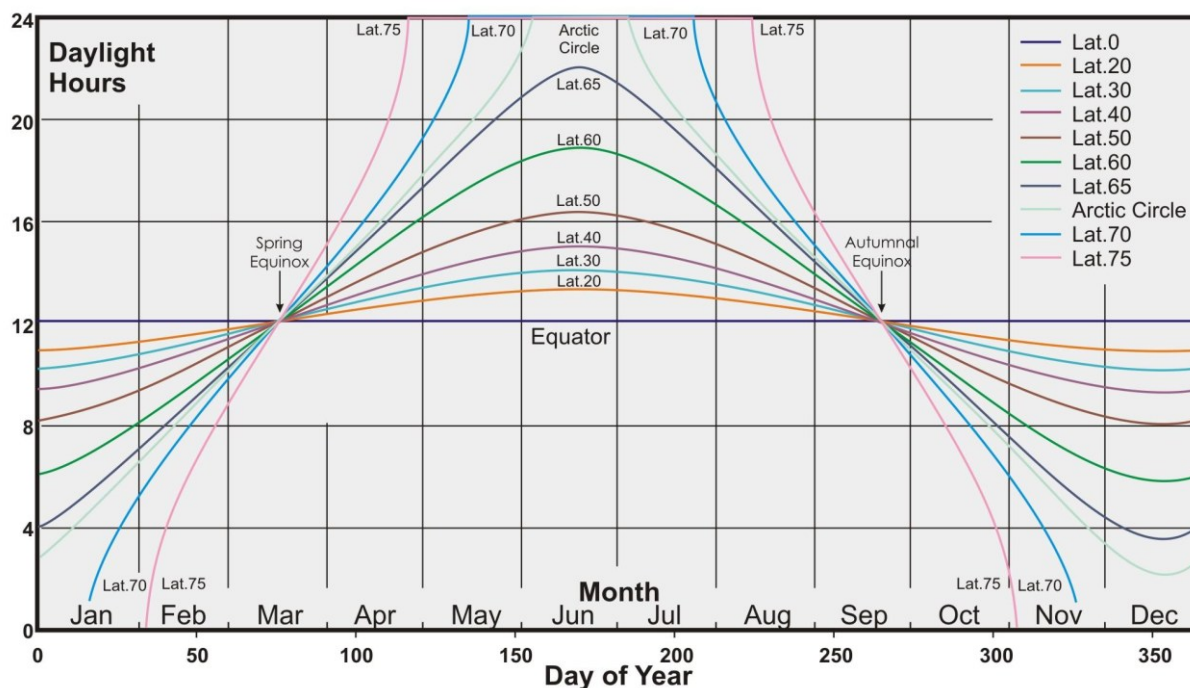
Neutrální rostliny: U těchto rostlin délka dne nemá zásadní vliv na kvetení, které je řízeno jinými faktory, jako je například teplota (Hess, 1983).

Receptorem světelného impulzu, který spouští fotoperiodickou reakci, je list rostliny. K tomu, aby rostlina začala kvést, stačí, aby pouze jeden list zaregistroval požadovaný poměr délky dne a noci (Hess, 1983). Rozdílné požadavky rostlin na délku dne pro kvetení jsou výsledkem adaptace k různým vnějším podmínkám.

Ve vyšších zeměpisných šířkách převažují dlouhodenní rostliny, zatímco v tropech jsou častější krátkodenní druhy. Ve středních zeměpisných šířkách mezi 35° a 40° se vyskytují jak dlouhodenní, tak krátkodenní rostliny, přičemž rozhodujícími faktory je zde teplota a půdní vlhkost (Hess, 1983). Odhaduje se, že v Evropě je asi 75 % kvetoucích rostlin dlouhodenních (Kolář, 2006).

2.6.3. Šířkový gradient a fotoperioda

Délka dne kolísá s geografickou šířkou, směrem od rovníku k pólům jsou větší rozdíly mezi zimou a létem. U pólů v létě až 24 h světla a v zimě 24 hodin tmy, naopak na rovníku po celý rok zůstává délka dne na 12 hodinách (viz obrázek 3).



Obrázek 3: Délka dne v průběhu roku v různých zeměpisných šířkách severní polokoule (zdroj: Dick, 2023)

Fotoperioda má velký vliv na začátek vegetační sezóny. Ve středních šířkách (např. 45° s. š.) se rašení typicky vyskytuje počátkem dubna (např. 1. dubna, DOY 91) při fotoperiodě 12,8 h. Ve vyšších šířkách (60° s. š.) raší rostliny později na jaře (květen–červen) při delších dnech (16–18 h). Naopak v tropických oblastech (22,5° s. š.) může rašení začít již v lednu nebo únoru při fotoperiodě 11–12 h (Ettinger et al., 2021). V nízkých a středních šířkách teplota často přebíjí fotoperiodu (rostliny raší dříve s oteplením). Ve vyšších šířkách je fotoperioda kritičtější regulátorem kvůli extrémním sezónním změnám délky dne, viz obrázek 3 (Ettinger et al., 2021). Další faktor hraje i nadmořská výška, kde ve vyšších polohách vlivem sněhové pokrývky a nízké teploty dochází k pozdějšímu rašení při delší fotoperiodě než v oblastech s nižší nadmořskou výškou (Wipf et al., 2009).

Fotoperioda je spolehlivý signál, který zabraňuje např. rašení během „falešného jara“ (krátkodobé oteplení v zimě). Latitudinální posun areálu druhu o cca 0,5° (tj. cca 60 km) za století znamená změnu zažívané fotoperiody v době rašení pouze o méně než 1 minutu. Pokud by se tedy druh přesunul ze 45. s. š., o 28,5° více k pólu, zažil by během rašení ve stejný den (1. dubna) stejný rozdíl délky dne a to 1,6 hodin, jako při posunu dne rašení o 30 dnů na 45 z.š. (Ettinger et al., 2021). Různé druhy a populace mají různou citlivost k fotoperiodě, některé jsou limitovány prahovou délkou dne, jiné jsou více plastické (Ettinger et al., 2021).

S dalším oteplováním se termíny rašení a dalších fenologických fází mohou natolik posunout, že zažívaná fotoperioda bude blízko „prahové hodnotě“ pro růst (např. méně než 10 h světla může některé druhy omezovat), což může omezit další posuny fenologie i možnosti expanze do vyšších šířek (Ettinger et al., 2021).

2.6.4. Vliv půdní vlhkosti na fenologii rostlin

Již bylo zmíněno, že teplota vzduchu s fotoperiodou jsou hlavními faktory ovlivňujícím nástup jarních fenologických fází, jako je rašení listů nebo kvetení ve vyšších zeměpisných šířkách. Dostupnost vody a množství srážek je nicméně klíčovým faktorem pro fenologii rostlin především ve druhé polovině roku, a to společně i s dalšími faktory, jako je fotoperioda (Larcher, 1988). Výzkum (Zohner et al., 2023) ukázal, že vyšší teploty a časnější začátek vegetační sezóny vedou k dřívějšímu stárnutí listů, ale zároveň k pozdějšímu opadávání listů díky teplejšímu podzimu. Zároveň k dřívějšímu opadu listů přispívá suché léto.

V nižších zeměpisných šířkách a v aridních oblastech má půdní vlhkost zásadní vliv na průběh fenologie. Například lesy v monzunových oblastech ztrácejí v období sucha během zimy a jara listy, aby zabránily většímu výparu vody (Larcher, 1988). Stejně tak jednoleté byliny ve Středomoří kvetou během zimních dešťů a během letního sucha uvadají.

Nejvíce na půdní vlhkost reagují travnaté porosty a byliny, jelikož mají proti dřevinám mělké kořeny (Jiang, 2023).

3. Predikování fenofází pomocí environmentálních dat

3.1. Základní typy fenologických modelů

Vegetační fáze je možno predikovat na základě environmentálních dat (Schwartz, 2024). Používá se k tomu celá řada modelů, které mají různé vstupní parametry.

Základní typy modelů se dělí na:

Empirické (statistické) modely (Chmielewski et al., 2001)

- Jednoduché regresní modely, které popisují vztah mezi fenologií a meteorologickými proměnnými (např. teplotou, srážkami).
- Často využívají lineární nebo nelineární regresi.
- Výhoda: jednoduchost a potřeba mála údajů.
- Nevýhoda: omezená možnost zobecnění a často platnost pouze v dané lokalitě.

Modely sumy efektivních teplot (GDD – Growing Degree Days, Forcing Temperature)

(McMaster et al., 1997)

- Předpokládají, že vývoj je řízen kumulovanou „efektivní“ teplotou nad určitou základní hodnotu (prahovou teplotu).
- Vývojová fáze nastane, když součet efektivních teplot dosáhne určité hodnoty.
- Velmi rozšířené u fenologie rostlin i hmyzu (Hodgson et al., 2011)

Chladové modely (Chilling models) (Chuine, 2001)

- Pro druhy s dormancí (např. ovocné stromy) je nutné nejprve „nasbírat“ potřebné množství Chilling jednotek (dormance), než začne akumulace teplotních sum.

Modely na základě fotoperiody a dalších faktorů (Blümel et al., 2015)

- Zohledňují i vliv délky dne (fotoperiody), případně vlhkosti, srážek či jiných environmentálních proměnných.
- Uplatňují se u druhů, jejichž vývoj je ovlivněn nejen teplotou.

Procesní (mechanistické, fyziologické) modely (Korzhukin et al., 1996)

- Snaží se simulovat skutečné fyziologické procesy, které vedou k určité fenologické fázi.

- Výhoda: větší zobecnitelnost i při změně klimatu.
- Nevýhoda: vysoké požadavky na data a znalosti fyziologie.

3.2. Tabulka modelů predikující fenologické fáze

Níže je seznam vybraných modelů a jejich charakteristiky (Tabulka 1). Uvedeny jsou vždy charakter modelu, modelovaný druh (dřevina, bylina), geografická oblast, modelovaná fenofáze, kvalita modelu a odkaz na článek.

Tabulka se zabývá modely predikující následující hlavní fenologické fáze (Hájková et al., 2012):

- **Rašení (Budburst)**: Fáze, kdy se pupeny začínají otevírat a objevují se nové listy
- **Kvetení (Flowering)**: Fáze, kdy květy rozkvétají a jsou opylovány
- **Plodnost (Fruiting)**: Fáze, kdy se vyvíjejí a dozrávají plody.
- **Barvení listů (Leaf barvení listů)**: Fáze, kdy listy začínají měnit barvu a opadávat
- **Opad listů (Leaf fall)**: Fáze, kdy listy opadávají z rostliny

Přesnost predikce se v tabulce uvádí v těchto metrikách:

R^2 (koeficient determinace) : Udává, jak velkou část variability závislé proměnné (například fenologického jevu) dokáže model vysvětlit pomocí nezávislých proměnných (Field, 2013).

Hodnota R^2 se pohybuje mezi 0 a 1:

- $R^2 = 1$ znamená, že model dokonale vysvětluje všechna pozorovaná data.
- $R^2 = 0$ znamená, že model nevysvětluje žádnou variabilitu v datech.

-RMSE (Root Mean Square Error): Měří průměrnou velikost chyb mezi hodnotami předpovězenými modelem a skutečnými pozorovanými hodnotami. Nižší hodnota RMSE znamená, že model má menší chyby a lépe odpovídá skutečnosti. RMSE má stejné jednotky jako modelovaná veličina, což usnadňuje interpretaci (Chai, Draxler, 2014).

Vzorec pro RMSE je:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

kde y_i jsou skutečné hodnoty a $\hat{y}_i$ hodnoty předpovězené modelem.

-NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency): Jde o statistickou míru, která se používá k hodnocení přesnosti modelových simulací ve srovnání s pozorovanými daty (Nash, Sutcliffe, 1970).

Hodnoty NSE:

NSE = 1: Model dokonale odpovídá pozorovaným datům.

NSE = 0: Model je stejně přesný jako prostý průměr pozorovaných hodnot.

NSE < 0: Model je méně přesný než průměr pozorovaných hodnot (tedy průměr by byl lepší prediktor než model).

Čím blíže je NSE hodnotě 1, tím lépe model simuluje skutečnost

-MBE (Mean Bias Error): Používá se k hodnocení systematické chyby modelu. Kladná hodnota MBE znamená, že model má tendenci nadhodnocovat (předpovědi jsou vyšší než skutečnost). Záporná hodnota MBE znamená, že model má tendenci podhodnocovat, jelikož předpovědi jsou nižší než skutečnost (Willmott, Matsuura, 2005).

-MRE (Mean Relative Error): Udává, jak velká je průměrná chyba modelu vzhledem ke skutečné hodnotě. Je vhodná pro porovnání přesnosti modelů napříč různými měřítky nebo jednotkami (Chai, Draxler, 2014).

-AIC (Akaike Information Criterion): Statistická metrika používaná pro porovnání kvality různých modelů na základě jejich shody s daty a složitosti. Nižší hodnota AIC znamená lepší model. AIC penalizuje modely s více parametry, aby se zabránilo přeučení (Overfittingu). AIC umožňuje porovnávat různé modely mezi sebou; absolutní kvalitu modelu však nehodnotí, pouze relativní mezi zvolenými modely (Burnham, Anderson, 2002).

Tabulka 1: Přehled studií využívající modely k predikci fenologických fází rostlin

Charakter modelů	Modelované druhy	Geografická oblast	Predikované fenofáze	Kvalita modelů	Autoři článku a rok vydání
Procesní modely založené na aktivní akumulaci teploty (AAT) a Start Day. Model AAT je dán tímto vzorcem: $AAT = \sum_{i=1}^n T_i, \quad T_i \geq 5^{\circ}\text{C}$ kde T_i je průměrná denní teplota a n je počet dní, během nichž teplota přesahuje 5°C. Model Start Day je sigmoidální, kde x je Start Day, A je maximální hodnota, y, k je koeficient tvaru křivky, a b je bod inflexe: $y = \frac{A}{1 + e^{k(b-x)}}$	Tilia amurensis Pinus koraiensis Betula platyphylla	42°2' s.š. 128°05' v.d.	Rašení	Modely AAT se ukázaly být spolehlivější než modely Start Day při předpovědi dynamiky listové plochy a počtu listů. Modely AAT měly vyšší hodnoty koeficientu determinace (R^2) a nižší hodnoty koeficientu střední kvadratické chyby (RMSE) než modely Start Day. Například pro Tilia, model AAT měl $R^2 = 0.9904$ a RMSE = 0.0380 pro relativní listovou plochu, zatímco model Start Day měl $R^2 = 0.8845$ a RMSE = 0.1320.	Xu, et al., (2021)
Studie používá lineární smíšené modely. Tyto modely zahrnují variaci mezi jednotlivými stromy, druhy a lokalitami, což zlepšuje přesnost předpovědi. Obecný vzorec lze vyjádřit jako: $Y = \beta_0 + \beta_1 X + Z\gamma + \epsilon$ kde Y je závislá proměnná (např. datum začátku nebo konce fenofáze), β_0 je konstanta, β_1 je regresní koeficient pro pevné účinky (např. vliv počasí), X jsou pevné účinky (např. teplota, srážky), Z je maticová forma pro náhodné účinky (např. variace mezi stromy nebo lokalitami), γ jsou náhodné účinky a ϵ je reziduální chyba.	Acer rubrum Acer saccharum Betula lenta Carya glabra Carya ovata Fraxinus americana Quercus alba Quercus rubra	USA: Univerzity of Connecticut 41.8067° s.š., 72.2523° z.d. Harvard forest: 42.5313° s.š., 72.1898° z.d.	Barvení listů	Model umožňuje kvantifikovat specifické fenologické odpovědi různých druhů stromů na environmentální stresory, jako jsou tepelný stres, sucha a silné deště. To je důležité pro pochopení, jak různé druhy reagují na klimatické změny. Konkrétní číselné hodnoty přesnosti, jako jsou koeficienty determinace (R^2) nebo střední chyby odhadu, nejsou ve studii uvedeny. Nicméně, studie zdůrazňuje, že zahrnutí lokálních variací a individuálních rozdílů mezi stromy významně zlepšuje přesnost modelu.	Xie, et al., (2018)

Studie zahrnuje jeden lineární model, šest jednofázových modelů a deset dvoufázových modelů. Jednofázové modely zahrnují pouze fázi ektodormance, zatímco dvoufázové modely zahrnují obě fáze: endodormance a ektodormance. Modely berou v úvahu teplotu, fotoperiodu a v některých případech i srážky. Teplotní odezva je často lineární (Growing-Degree-Day) nebo Sigmoidální. Dvoufázové modely zahrnují sekvenční, paralelní, střídavé a sjednocené modely. Každý z nich popisuje vztah mezi akumulací chladu a akumulací tepla. Jednoduchý teplotní časový model (TT) používá akumulaci teplotních dnů (GDD) k předpovědi začátku vegetační sezóny. Teplotní časový model (TT): Používá akumulaci teplotních dnů (GDD) k předpovědi začátku vegetační sezóny. $GDD = \sum_{t=t_0}^{t_1} (T_{mean} - T_{base})$ kde Tmean je denní průměrná teplota, Tbase je základní teplota, t0 je počáteční datum a t1 je datum začátku vegetační sezóny. Fototermální časový model (PTT): Zahrnuje kromě teploty také fotoperiodu.	Studie se zabývá modelováním fenologie pro pět typů vegetace v severojižním transektu Severovýchodní Asie. Tyto typy vegetace jsou: Deciduous needleleaf forest (DNF) - Opadavé jehličnaté lesy (modřín) Mixed forest (MF) - Smíšené lesy Open shrublands (OSL) - Otevřené keřové porosty Woody savannas (WS) - Dřevnaté savany Grasslands (GL) - Pastviny	Zeměpisné souřadnice studie sahají mezi 32° až 78° s.š. a 105° až 118° v.d.	Rašení, Start Of Season (SOS)	Ve studii měly modely pro většinu vegetačních typů (DNF, MF, OSL, WS) vysoké korelační koeficienty, často přesahující 0,7, což naznačuje dobrou shodu mezi modelovými předpověďmi a satelitními daty. Pro pastviny (GL) však korelační koeficienty byly nižší, obvykle pod 0,5. Nižší hodnoty RMSE znamenají lepší modelovou přesnost. Studie ukázala, že modely s teplotní odezvou založenou na akumulaci teplotních dnů (GDD) měly nižší RMSE ve srovnání s modely se sigmoidální teplotní odezvou. Pro různé vegetační typy se RMSE lišily, ale obecně byly nižší pro modely, které zahrnovaly pouze fázi ektodormance, podobně jako modely zahrnující obě fáze dormance. Spolehlivost modelů byla hodnocena také pomocí Akaikeova informačního kritéria (AIC), které zohledňuje jak přesnost modelu, tak jeho složitost. Modely s nižším AIC jsou obecně považovány za lepší. Ve studii se ukázalo, že modely, které zahrnovaly pouze fázi ektodormance, měly podobné RMSE a AIC jako modely zahrnující obě fáze dormance, což naznačuje, že jednodušší modely mohou být dostatečně spolehlivé pro předpověď začátku vegetační sezóny.	Mo, et al., (2023)
---	---	--	--------------------------------------	---	---------------------------

Výzkum využíval tyto metody: Lineární regresní model: Použitý k modelování vztahu mezi fenologickými stádii a klimatickými faktory. Základní rovnice pro lineární regresi je: $\beta = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y$ kde β jsou regresní koeficienty, X je maticí nezávislých proměnných, Y je vektorem závislých proměnných a T označuje transpozici matice. Spearmanova ranková korelační rovnice: Použita k výpočtu korelačního koeficientu ρ mezi dvěma proměnnými: $\rho = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n * (n^2 - 1)}$ kde $\sum d^2$ je součet čtverců rozdílů pořadí a n je velikost vzorku.	Castanea mollissima Paulownia fortunei Melia azedarach Magnolia grandiflora	Zeměpisné souřadnice jednotlivých pozorovacích stanic sahají od 24°00's.š. do 26°30' s.š. a od 109°30' v.d. do 116°45' v.d.	Kvetení	Autoři neuvádějí hodnoty RMSE, které by kvantifikovaly přesnost těchto lineárních modelů. Nicméně, studie používá lineární regresní modely a Spearmanovu rankovou korelační analýzu k vyhodnocení vztahů mezi fenologickými stádii a klimatickými faktory. lineární regrese: Použita k analýze trendů ve fenologických stádiích a jejich vztahu s klimatickými faktory. Studie uvádí, že teplota je primárním faktorem ovlivňujícím fenologické změny, s negativní korelací mezi fenologickými stádii a jarními teplotami. Spearmanova ranková korelace: Použita k posouzení vztahů mezi fenologickými stádii a klimatickými faktory, zvláště když data nevyhovují předpokladům normálního rozložení. Spolehlivost modelů v této studii je založena na kvalitě dat a metodách použitých pro analýzu. Studie se opírá o dlouhodobá pozorovací data z Čínské fenologické pozorovací sítě, která zajišťují konzistentní a spolehlivé záznamy o fenologických stádiích. Použití Spearmanovy korelace a lineární regrese umožňuje spolehlivé hodnocení vztahů mezi fenologickými stádii a klimatickými faktory.	Liu, et al., (2023)
--	---	--	----------------	--	----------------------------

TPM Model (Temperature and Photoperiod Multiplicative Model): Model je popsán takto: $S_{sen} = \sum_{i=D_{start}}^Y R_{sen}(T_i, P_i) = S_{sen}^*$ Kde: Ssen – kumulativní stav barvení listů do dne Y (datum pozorované fenologické události; například zbarvení nebo hnědnutí listů). Rsen(T_i,P_i) – denní rychlost barvení listů (viz níže). Dstart – den začátku akumulace (liší se podle toho, co spouští senescenci – buď krátká fotoperioda, nebo nízká teplota). Ssen* – prahová hodnota, při které dojde k pozorované fenologické události. Stanovení počátečního dne Dstart: Fotoperiodicky řízené barvení listů (TPMp): Dstart=první den po letním slunovratu (i>173), kdy Pi<Pstart Teplotně řízené barvení listů (TPMt): Dstart=první den po vrcholu průměrné minimální teploty(i>200), kdy Ti<Tstart Kde: Pi je délka dne (fotoperioda) v den i Pstart je prahová hodnota fotoperiody Ti je minimální denní teplota v den i Tstart je prahová hodnota teploty	Dřeviny: Amygdalus davidiana Armeniaca vulgaris Lycium chinense Populus Canadensis Populus lasiocarpa Populus simonii Salix cupularis Salix matsudana Tamarix ramosissima Ulmus pumila Byliny: Agropyron cristatum Carex przewalskii Elymus nutans Festuca ovina Iris lactea Kobresia pygmaea Koeleria cristata Leymus secalinus Medicago sativa Phragmites australis Plantago asiatica Poa alpina Poa annua Puccinellia tenuiflora Scirpus distigmaticus Stipa sareptana Taraxacum mongolicum	Zeměpisné souřadnice jednotlivých pozorovacích stanic sahají od 29° 03' s.š. po 37° 23' s.š. a od 88° 53' v.d. po 102° 58' v.d.	Barvení listů	TPM Model: RMSE: Střední RMSE pro model TPM byl nižší než u modelů DM a SIAM ve většině případů. Střední RMSE pro TPM byl o 0,2 až 0,5 dní nižší než u DM a SIAM. NSE: Střední NSE pro TPM byl vyšší než u DM a SIAM, což naznačuje lepší schopnost modelu vysvětlit variabilitu pozorovaných dat. Korelační koeficient: TPM měl vyšší korelační koeficient mezi předpovězenými a pozorovanými daty než DM a SIAM. DM a SIAM Model: Tyto modely měly vyšší RMSE a nižší NSE než TPM, což naznačuje nižší přesnost a spolehlivost ve srovnání s TPM. Validační chyba: TPM měl nižší validační RMSE než DM a SIAM ve většině případů, což ukazuje na lepší schopnost předpovídat podzimní fenologii mimo období kalibrace. Shrnutí Model TPM vykazoval lepší kvalitu a spolehlivost než modely DM a SIAM, jak v kalibrační, tak validační fázi. To je dáno jeho schopností lépe zahrnovat interakci mezi teplotou a jeho fotoperiodou a jeho obecnější použitelností pro různé druhy rostlin.	Lang et al., (2019)
---	---	--	----------------------	--	----------------------------

Vzorec denní rychlosti opadu listí:

$$R_{\text{sen}}(T_i, P_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \exp(a \cdot (T_i \times P_i - b))} & i \geq D_{\text{start}} \\ 0 & i < D_{\text{start}} \end{cases}$$

Kde:

a = rychlost akumulace barvení listí v závislosti na fotoperiodě

b = rychlost akumulace barvení listí v závislosti na teplotě

Tyto parametry určují, jak rychle se spouští fyziologické procesy vedoucí k opadu listů při změnách denní délky nebo teploty.

Porovnání s jinými modely:

DM Model (Delpierre et al., 2009 b): Předpokládá, že opadání listů je řízeno fotoperiodou a nízkou teplotou. Opadání začíná, až když obě podmínky jsou splněny.

SIAM Model (Keenan a Richardson, 2015): Zahrnuje lineární regresní vztah mezi jarním probuzením a prahem pro opadání listů.

Dva modely: Model 1: Založen na korelacích environmentálních proměnných na fenologických stanicích. Využívá nadmořskou výšku, sklon svahu, orientaci svahu a rok pozorování. Vhodný pro regionálně omezené aplikace, kde jsou k dispozici údaje o stanovišti. Model 2: Využívá interpolované měsíční průměrné teploty vzduchu a počet slunečních hodin na fenologických stanicích. Založen na gridovaných meteorologických datech s rozlišením 1 km. Vhodný pro aplikaci v širším měřítku (regionální, evropské). Oba modely byly vytvořeny pomocí zobecněného lineárního smíšeného modelu (GLMM).	Fagus sylvatica	Serra del Prete v jižních Apeninách v Itálii: 39°54's.š. 16°08' v.d.	Rašení, barvení listů, pád listů	Pro první rašení listů: Model 1: $R^2 = 0,56$ pro NPN data, $R^2 = 0,40$ pro ICP Forests data Model 2: $R^2 = 0,68$ pro NPN data, $R^2 = 0,45$ pro ICP Forests data Pro všeobecné zbarvení listů: Model 1: $R^2 = 0,33$ pro NPN data, $R^2 = 1,12$ pro ICP Forests data Model 2: $R^2 = 0,50$ pro NPN data, $R^2 = 0,15$ pro ICP Forests data Pro opad listů: Model 1: $R^2 = 0,31$ pro NPN data, $R^2 = 0,23$ pro ICP Forests data Model 2: $R^2 = 0,61$ pro NPN data, $R^2 = 0,12$ pro ICP Forests data Modely uspokojivě předpovídaly první rašení listů a opad listů buku v lesních stanovištích. Všeobecné zbarvení listů bylo predikováno méně přesně. Model 2 (založený na interpolovaných teplotách a slunečních hodinách) měl obecně lepší výsledky než Model 1 (založený na environmentálních proměnných).	Vilhar et al., (2018)
---	-----------------	--	----------------------------------	--	-----------------------

Modely pro rozvinutí listů: Spring Warming Model (Forcing) $FU1 = \sum_{t_0}^{t_{pheno}} \frac{28.4}{1 + e^{(3.4 - 0.185 \cdot T)}}$ Kde T je průměrná teplota, t0 je zimní slunovrat a tpheno je datum rozvíjení listů. Tento model je založen na akumulaci tepla a je nejčastěji používán v modelech, jako je CLM4.5. Předpokládá se, že listy se rozvíjí, když teplota překročí určitou hranici. Sequential Model (Chilling): $CU1 = \sum_{t_0}^{t_1} \begin{cases} 1 & \text{pokud } T \leq 5 \\ 0 & \text{pokud } T > 5 \end{cases}$ Předpokládá, že dormance a květní období jsou oddělená. Teplotní požadavky se aktivují až po dosažení určitého množství chladné akumulace. Parallel Model: Chilling a Forcing probíhají současně. Vzorec pro Chilling je stejný jako v Sekvenčním modelu, ale Forcing se akumuluje současně. Alternating Model: Chilling a Forcing se střídají. Modely pro opadání listů: Tyto modely simulují datum, kdy listy opadají. Studie zahrnovala čtyři typy modelů: Model teplotní prahové hodnoty (T Model): Listy opadají, když teplota klesne pod určitou hranici (obvykle 5 °C). Model fotoperiodické prahové hodnoty (PT Model): Listy opadají, když délka dne klesne pod určitou hranici (obvykle 10.91 hodin). Model studených stupňů a fotoperiodicky závislý (CDD/P Model): Listy opadají na základě akumulace studených stupňů a fotoperiodických změn. Model ovlivněný letními teplotami (SummerIA Model): Nový model, který zahrnuje vliv letních teplot na proces stárnutí listů.	Studie nezmiňuje specifické druhy, ale obecně se zabývá fenologií listnatých lesů v Číně.	Changbais-han Čína: 41.7° s.š. 128.1° v.d.	Rašení listů, opad listů	Simulace jarního rašení listů (leaf unfolding) Alternating CU1 model: R (korelační koeficient): 0,81 RMSE: 7 dní MBE: 6 dní MRE: -1,10 % AIC: 5,23 Parallel CU1 model: R: 0,80 RMSE: 6 dní MBE: 6 dní MRE: 2,79 % AIC: 5,40 Spring warming model (původní model v CLM4.5): R: 0,62 RMSE: 8 dní MBE: 9 dní MRE: 4,51 % AIC: 6,07 Simulace podzimního opadu listů (Leaf Falling): SummerIA model (nový model): R: 0,92 RMSE: 6 dní MBE: 14 dní MRE: -1,75 % AIC: 6,98 T model (teplotní práh): R: 0,93 RMSE: 6 dní MBE: 18 dní MRE: 5,51 % AIC: 7,43 PT model (fotoperioda): R: 0,57 RMSE: 5 dní MBE: 28 dní	Lv et al., (2023)
---	--	--	---------------------------------	--	--------------------------

				MRE: 6,72 % AIC: 8,14 CDD/P model: R: 0,53 RMSE: 20 dní MBE: 19 dní MRE: 0,37 % AIC: 7,67 Nejlepší výsledky v simulaci jarního rašení listů poskytl „Alternating model“ (střídavý model) a v simulaci podzimního opadu listů nový model „SummerIA“ (model s prahovou hodnotou závislou na letní teplotě). Úpravy modelu vedly k výraznému zlepšení přesnosti simulací fenologických dat i hrubé primární produkce (GPP).	
--	--	--	--	--	--

Modely zahrnující pouze působení tepla (ForcSar, ForcTT): Model ForcSar <i>y</i> takové, že $f_c(y) = F^*$ $f_c(t) = \sum_{t_0}^t R_f(x_t)$ $R_f(x_t) = \frac{28.4}{1 + e^{-0.185(x_t - 18.4)}} \quad \text{pro } x_t > 0^\circ \text{C}$ Kde: <i>y</i> je datum kvetení F* je kritická hodnota stavu Forcingu pro přechod z kviscence do kvetení <i>x_t</i> je denní průměrná teplota R_f je funkce rychlosti Forcingu Pro všechny modely platí, že datum kvetení <i>y</i> nastane, když je dosaženo kritického stavu Forcingu(F*): <i>y</i> takové, že $Sf(y) = F^*$ Kritický stav Forcingu(F*) je vztažen ke stavu Chillingu následovně: F*=aexp(bSc(y)) Kde: S_f je stav Forcingu S_c je stav Chillingu a, b jsou konstanty (a > 0, b < 0) Dále jsou zde uvedeny modely kombinující chlad a teplo (SeqTT, SeqSar, Par1TT, Par1Sar, PaR² TT, PaR² Sar).	Aesculus hippocastanum L. Alnus glutinosa Gaert. Betula verrucosa Ehrh. Buxus sempervirens L. Carpinus betulus L. Castanea sativa Mill. Corylus avellana L. Olea europaea L. Platanus acerifolia Willd. Taxusbaccata L. Ulmus minor Mill. Ulmus montana L.	Francie Montpellier: 43.3° s.š. 3.6 v.d. Lyon: 45.6° s.š. 5.2° v.d.	Kvetení	Většina modelů vykazovala vysokou interní validitu, což znamená, že dobře vysvětlovaly data, která byla použita pro jejich kalibraci. Procento vysvětlené variability se pohybovalo od 27 % do 98 % s průměrem 77% pro Lyon a podobně pro Montpellier. Některé modely, jako SeqSar a Par1Sar, prokázaly vysokou externí validitu, což znamená, že dobře předpovídaly data, která nebyla použita pro kalibraci. Tyto modely byly schopné vysvětlit až 97% variability externích dat. studie naznačuje lokální adaptaci fenologie u <i>Buxus sempervirens</i>, ale ne u <i>Platanus acerifolia</i>. To znamená, že modely pro <i>B. sempervirens</i> předpovídaly kvetení lépe v místě, kde byly kalibrovány, zatímco modely pro <i>P. acerifolia</i> fungovaly dobře v obou lokalitách.	Chuine et al., (1999)
--	--	--	----------------	---	------------------------------

Model DL (Day-Length-Triggered): Tento model je založen na pevném dni v roce, kdy začíná akumulace teplotních jednotek pro rašení pupenů. Je jednoduchý a nepotřebuje komplexní teplotní data. Model DL nepoužívá složitý matematický vzorec, ale spíše pevné datum, kdy začíná akumulace teplotních jednotek. Model IAA (s chladivým efektem): Tento model zahrnuje chladivé jednotky (CU, Chilling Units) a teplotní jednotky (FU, Forcing Units) pro modelování rašení pupenů. Vzorec pro Chilling jednotky (CU): $M_{ch}(t) = \begin{cases} 0 \text{ CU/day,} & T(t) \leq -3.4^{\circ}\text{C} \\ 0.159 \text{ CU/day}^{\circ}\text{C}^{-1}, & -3.4^{\circ}\text{C} < T(t) \leq 3.5^{\circ}\text{C} \\ T(t) + 0.506 \text{ CU/day,} & 3.5^{\circ}\text{C} < T(t) \leq 10.4^{\circ}\text{C} \\ T(t) + 1.621 \text{ CU/day,} & 10.4^{\circ}\text{C} < T(t) \leq 10.4^{\circ}\text{C} \\ 0 \text{ CU/day,} & T(t) > 10.4^{\circ}\text{C} \end{cases}$ Vzorec pro Forcing jednotky (FU): $m_{fre}(t) = \begin{cases} 0 \text{ FU/day,} & T(t) \leq 0^{\circ}\text{C} \\ \frac{a \cdot \text{FU/day}}{1 + e^{-b(T(t)-c)}}, & T(t) > 0^{\circ}\text{C} \end{cases}$ kde a, b, a c jsou parametry, které jsou optimalizovány pro nejmenší RMSE (Root Mean Square Error). Studie také zmiňuje další modely (IBB, II, III, IV), které jsou popsány v práci Hänninena (1990), ale tyto modely nebyly v této studii tak úspěšné jako modely DL a IAA.	Pinus sylvestris L.	Finsko: Laanila, Inari: 68°30' s.š. 27° 28' v.d. Vanttausko- ki, Rovaniemi: 66°22' s.š. 26°43' v.d.	Rašení	Model DL (Day-Length-Triggered): RMSE byl 2 dny v severní lokalitě a 4 dny v jižní lokalitě. Model IAA (s Chilling efektem): RMSE se pohyboval mezi 3,1 a 3,4 dny v jižní lokalitě, ale přesné hodnoty pro severní lokalitu nejsou uvedeny.	Salminen, H. & Jalkanen, R. (2015)
--	----------------------------	---	---------------	---	---

Teplotní modely: Používají akumulaci tepla (např. Growing Degree Days) k předpovědi rašení listů. $GDD = \sum_{i=1}^n \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} - T_{base}$ kde Tmax a Tmin jsou maximální a minimální denní teploty, Tbase je základová teplota pro růst rostliny, a n je počet dní. Fotoperiodické modely: Berou v úvahu délku dne a noční dobu. Kombinované modely: Kombinují teplotní a fotoperiodické faktory.	Aesculus hippocastanum Betula pendula Fagus sylvatica Quercus robur Larix decidua Picea abies	Střední Evropa (Německo, Švýcarsko, Rakousko, Slovinsko a Chorvatsko)	Rašení	Modely dosáhly střední chyby predikce (RMSE) kolem 7-9 dní pro kalibraci napříč místy a roky a kolem 4-5 dní pro kalibraci specifickou pro každé místo. Žádný model nebyl výrazně lepší než ostatní, ačkoli jednoduché modely založené na teplotě a fotoperiodě často dosahovaly lepších výsledků než komplexnější modely zahrnující Chilling. Modely měly tendenci podceňovat meziroční variabilitu a selhávaly při předpovědi velmi raných nebo pozdních dat rašení listů. Přenos parametrů kalibrovaných pro jedno místo na jiná místa vedl k téměř dvojnásobnému zvýšení chyby predikce.	Basler, 2016
--	---	--	---------------	---	---------------------

Studie popisuje čtyři typy modelů pro předpověď začátku tvorby dřeva v jarním období. Model teplotního prahu (Tt): $bE = \min(d) \text{ tak, že } T(d) \geq T^*.$ Předpokládá, že tvorba dřeva začíná, když je překročen určitý teplotní práh. Model teplotního a fotoperiodického prahu (TDLt): $bE = \min(d) \text{ tak, že } T(d) \geq T^* \text{ a } d > j$ $s \ j = \min(d) \text{ tak, že } DL(d) \geq DL^* \text{ a } d > -10$ kde DL je délka dne a DL* fotoperiodický práh. Model předpokládá, že tvorba dřeva začíná, když jsou překročeny jak teplotní, tak fotoperiodické prahy. Model tepla (HS Heat-Sum): $bE = \min(d) \text{ tak, že } F(d) \geq F^*$ kde F(d) je akumulace tepla a F* je požadovaná suma tepla. Model ovlivněný chladem a teplem (CiHS Chilling-influenced-Heat Sum): Předpokládá, že tvorba dřeva začíná po akumulaci Chilling a Forcing teploty. Vzorec pro Chilling: $C_{\text{tot}}(d) = \sum_{C_{\text{start}}}^{C_{\text{end}}} R_c(T(d))$ kde Rc(T(d)) je denní míra akumulace chladu. Vzorec pro Forcing: $F^*(d) = g \times C_{\text{tot}}(d) + h$ kde g je sklon vztahu mezi požadovanou sumou tepla a akumulací chladu, a h je požadovaná suma tepla bez chladu.	Larix decidua Pinus sylvestris Picea abies Picea mariana	Konkrétní zeměpisné souřadnice studijních lokalit nejsou v abstraktu uvedeny, ale studie zahrnuje lokality z Francie, Německa, Španělska, Slovinska, Kanady, Finska, Rakouska, a České republiky.	Začátek fáze zvětšování xylémových buněk (jarní fenologická fáze).	Studie zmiňuje, že Chilling-influenced Heat-Sum model (model ovlivněný chladem a teplem) obdržel největší podporu pro všechny čtyři studované druhy konifer a předpovídal validační data s chybou 7,7 dní, což je v rámci jedné denní rezoluce pozorovaných dat. Tato chyba naznačuje, že model je poměrně spolehlivý pro předpověď začátku tvorby dřeva.	Delpierre et al., (2019)
---	---	--	---	--	---------------------------------

Zobecněné aditivní modely (GAM, General Additive Model): použity k popisu obecných trendů v začátku tvorby dřeva ve vztahu k průměrné roční teplotě a zeměpisné šířce. Lineární smíšené modely (LMM Linear Mixed Model): hlavní analytický nástroj studie, 2 modely. Model 1 modeluje začátek tvorby dřeva jako funkci: Fotoperiody Teplotního Forcingu Chillingu (období chladu) Indexu sucha PDSI Model 2 místo fotoperiody užívá průměrnou roční teplotu Vzorce modelů: Model 1: $D_{ijk} = \alpha + \beta_1 P_{ijk} + \beta_2 F_{ijk} + \beta_3 C_{ijk} + \beta_4 PDSI_{ijk} + a_i + b_j + \varepsilon_{ijk}$ Model 2: $D_{ijk} = \alpha + \beta_1 T_{ijk} + \beta_2 F_{ijk} + \beta_3 C_{ijk} + \beta_4 PDSI_{ijk} + a_i + b_j + \varepsilon_{ijk}$ kde D je datum začátku tvorby dřeva, P je fotoperioda, F je Forcing, C je Chilling, PDSI je index sucha, T je průměrná roční teplota, a a b jsou náhodné efekty pro druh a lokalitu.	Časně sukcesní druhy: Juniperus przewalskii Juniperus thurifera Larix decidua Pinus flexilis Pinus halepensis Pinus heldreichii Pinus longaeva Pinus massoniana Pinus peuce Pinus pinaster Pinus ponderosa Pinus sylvestris Pinus tabulaeformis Pinus uncinata Pozdně sukcesní druhy: Abies alba Abies balsamea Abies georgei (var. smithii) Cedrus libani Picea abies Picea mariana Pinus cembra	Studie zahrnovala lokality na severní polokouli v rozmezí zeměpisných šířek od 23° do 67° s.š. Pokrývala široké geografické rozpětí zahrnující subtropické, středomořské, mírné a boreální biomy v Severní Americe, Evropě a Asii.	Hlavní modelované fáze: Začátek tvorby dřeva – definován jako datum objevení se první zvětšující se buňky xylému. Konec tvorby dřeva – definován jako datum ukončení tloušťnutí buněčných stěn. Další sledované fáze: Začátek buněčného dělení v kambialní zóně. Začátek tloušťnutí buněčných stěn v buňkách xylému. Začátek zrání buněk xylému.	Model 1 (s fotoperiodou): Marginální R²: 0,43 Podmíněný R²: 0,98 Model 2 (s průměrnou roční teplotou): Marginální R²: 0,84 Podmíněný R²: 0,94 Model 2 vysvětloval výrazně větší podíl variability v datech než Model 1, zejména pokud jde o fixní efekty (marginální R²).	Huang J. G. et al., (2020)
Thermal-Time Model (Model teplotního času): Tento model předpokládá, že Forcing (akumulace vysokoteplotních jednotek) začíná v pevně stanoveném datu a pokračuje, dokud není dosaženo kritického prahu Fcrit.	Alnus incana Alnus glutinosa Populus tremula Betula spp Pinus sylvestris	Finsko: 62°14' s.š. 25°44' v.d.	Rašení, kvetení	Přesnost modelů (RMSE) Thermal-time model měl nejnížší RMSE: Rozsah: 2–6 dní	Linkosalo, T., Häkkinen, R., & Hänninen, H. (2006)

Vzorec modelu: $S_F(t_i) = \int_{t_0}^{t_i} r_F(T(t))dt \approx \sum_{t_0}^{t_i} (r_F(T(t)) \cdot \Delta t)$ Kde: SF(ti): Stav Forcingu k datu ti rF(T(t)) Rychlost Forcingu závislá na teplotě T(t) t0: Datum ukončení dormance. Fcrit: Kritická hodnota Forcingu potřebná k pučení. Pučení nastane, když SF(ti) ≥ FcritSF 2. Sequential Model (Sekvenční model): Tento model zahrnuje fázi Chillingu (akumulace nízkoteplotních jednotek), která musí být dokončena před zahájením Forcingu. $S_C(t_i) = \int_{a_0}^{t_i} r_C(T(t))dt \approx \sum_{a_0}^{t_i} (r_C(T(t)) \cdot \Delta t)$ SC(ti): Stav Chillingu k datu ti. rC(T(t)): Rychlost Chillingu závislá na teplotě T(t) a0: Datum zahájení Chillingu (obvykle 1. září). Ccrit: Kritická hodnota Chillingu potřebná k dokončení dormance. Akumulace Forcingu: Po dosažení Ccrit se Forcing počítá stejně jako v Thermal-Time modelu. 3. Nullifying Model (Nulifikující model): Modifikace sekvenčního modelu, která resetuje stav Forcingu na nulu, pokud teplota klesne pod určitou hranici (TcritNM). 4. Reversing Model (Reverzní model): Zahrnuje hypotetickou reverzibilní fázi mezi Chillingem a Forcingem. Během této fáze se stav vývoje (SR(ti)) mění podle rozdílu mezi aktuální				(nejpřesnější pro <i>Populus tremula</i> – 2 dny, nejhorší pro <i>Alnus glutinosa</i> – 6 dní). Nullifying model byl méně přesný než Thermal-Time, ale lepší než sekvenční model: RMSE se pohyboval o 1–3 dny výše než u Thermal-Time. Reversing model vykazoval nejvyšší RMSE: Až 7–10 dní u některých druhů (např. <i>Alnus incana</i>). Sekvenční model (s fází Chillingu) měl RMSE až o 30 % vyšší než Thermal-Time. Vysvětlená variabilita (R²): U Thermal-Time modelu byla R² blízka 1 pro <i>Betula spp.</i> (kvetení i rašení pupenů), což ukazuje na téměř dokonalou shodu s pozorovanými daty. U Nullifying modelu R² klesala na 0.85–0.95 v závislosti na druhu. Reversing model vykazoval R² pod 0.8 u druhů citlivých na teplotní výkyvy (např. olše).
---	--	--	--	--

teplotou a kritickou teplotou (T_{critRM}): $r_R(t) = T(t) - T_{crit}^{RM}$					
Vývoj během této fáze: $S_R(t_i) = \max \left(\int_{t_r}^{t_i} r_R(t) dt, 0 \right)$					
Když $SR(t_i) \geq R_{crit}$, začíná nevratný ontogenetický vývoj simulovaný jako v sekvenčním modelu.					

Podle analýzy publikovaných modelů (Tabulka 1) se zdá, že model založený na aktivní akumulované teplotě (AAT) je nejpřesnějším pro predikci fenologických fází listnatých stromů ve středoevropských temperátních lesích (Xu et al., 2021). Tento model lépe vysvětluje variabilitu v počtu listů a listové ploše ve srovnání s modely založenými pouze na dni v roce (Start Day). Konkrétně článek porovnával modely AAT a Start Day pro predikci rostlinné biomasy jako je nárůst počtu listů a listové plochy u tří druhů stromů (lípa, bříza, borovice) v severovýchodní Číně. Modely AAT měly vyšší koeficient determinace (0,9691-0,9966) a nižší střední chybu odhadu (0,0179-0,0517) ve srovnání s modely Start Day (R^2 0,5504-0,9902 a RMSE 0,0307-0,2005), zejména pro predikci počtu listů.

Další studie také potvrzují, že teplota je hlavním environmentálním faktorem ovlivňujícím jarní fenologii stromů v temperátních oblastech. Například studie Mo et al., (2023) ukazuje, že denní maximální teploty indukují zpožděné efekty na rašení listů u dřevin v širokém rozmezí nadmořských výšek. Článek pak modeluje nástup jarního růstu vegetace v celé severní polokouli v závislosti na teplotě.

Některé studie se zaměřují na konkrétní druhy stromů, jako je buk lesní, a vyvíjejí modely pro predikci data rašení listů v lesních porostech (Vilhar et al., 2018). Jiné studie, jako Huang J. G. et al., (2020) nebo Delpierre et al., (2018), se věnují fenologii růstu dřeva. Tyto modely využívají kombinaci teploty a fotoperiody jako prediktory. Souhrnně lze říct, že modely založené na akumulované teplotě jsou nejpřesnější pro predikci jarní fenologie listnatých stromů ve středoevropských lesích. Teplota je klíčovým faktorem ovlivňujícím jarní fenologii, i když fotoperioda může hrát roli u některých druhů.

Některé studie se zabývaly podzimní fenologií, např. Lv et al., (2023) nebo Lang et al., (2019), kde poukazují na to, že fotoperioda má významný vliv na začátek barvení listů i v kombinaci s nízkými teplotami. Některé modely se zabývají i vlivem letních teplot na barvení listů, např. Lv et al., (2023).

4. Metodika

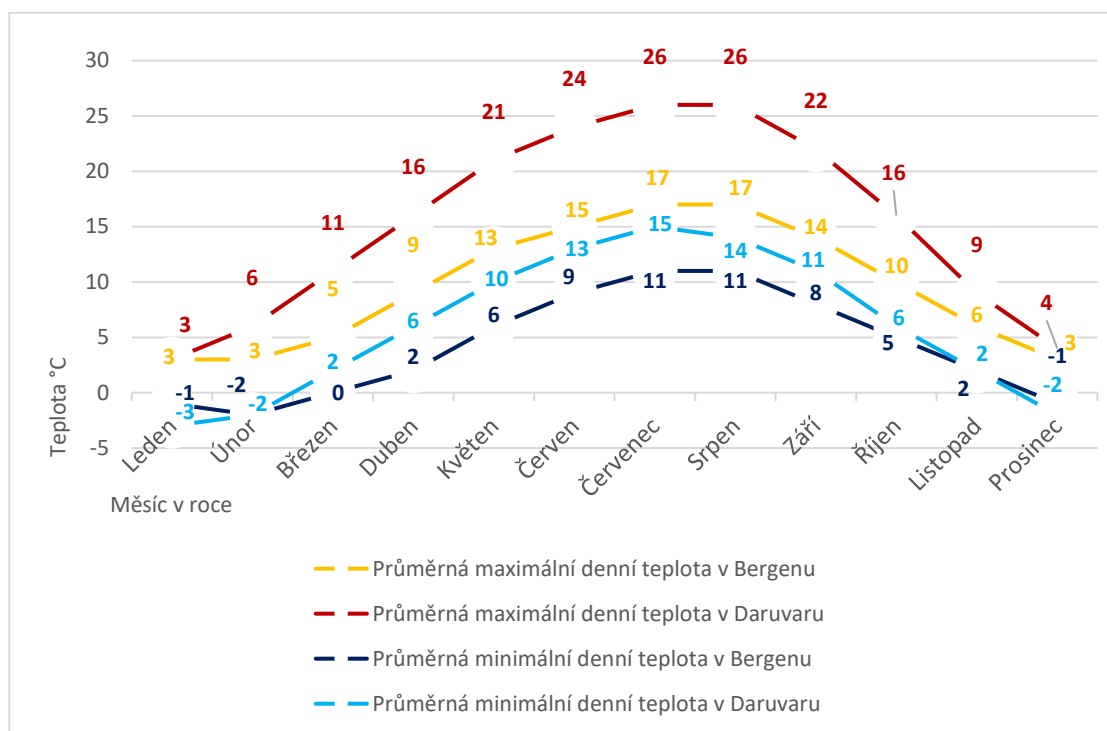
4.1. Studovaná oblast

Na základě dostatečného množství dat a zároveň možnosti studování dvou druhů dřevin na obou lokalitách byly pro bakalářskou práci vybrány buk lesní (*Fagus sylvatica*) a smrk ztepilý (*Picea abies*). Pro oba tyto druhy se dají najít ve fenologické databázi pep725.eu data na mnoha lokalitách (Templ et al., 2018). Buk a smrk mají odlišné typy fenologických fází, a proto může být jejich studium fenologie reprezentativní.

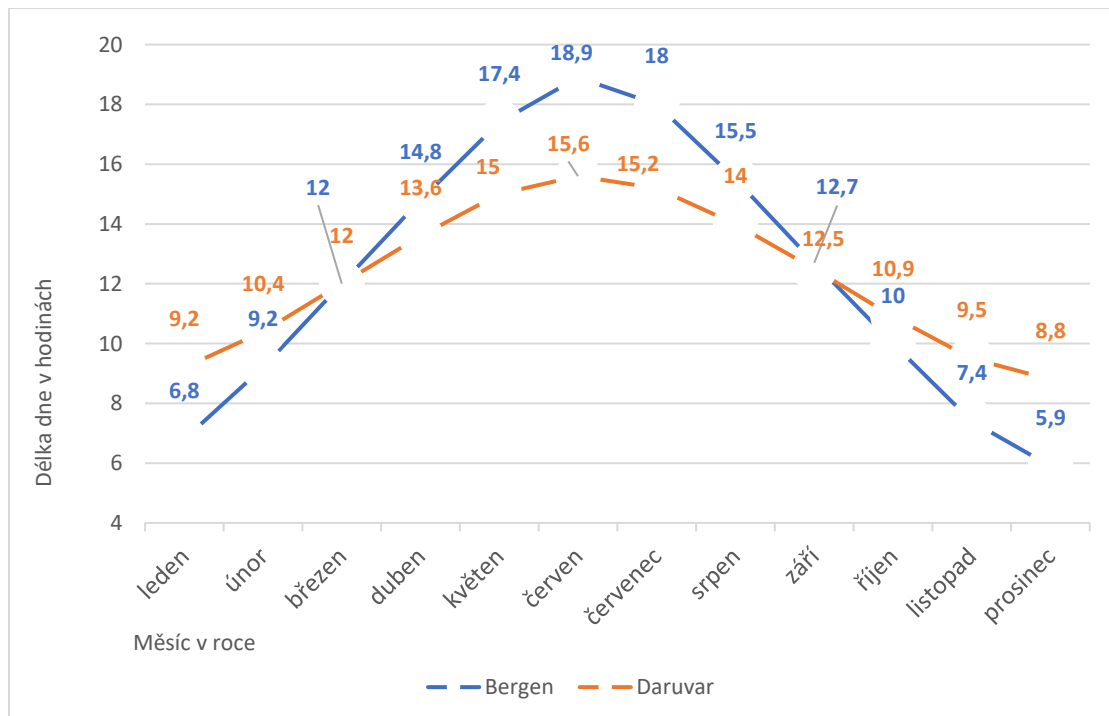
Pro vybrání lokality je nejlepší umístění blízko severního i jižního okraje areálu těchto druhů dřevin. Z dostupných dat byly vybrány lokality Fanahammaren a Daruvar. Severní lokalita se nachází v Norsku na 60°16' s.š. a 5°21' v.d. v nadmořské výšce 50 m nedaleko města Bergen na pobřeží Norského moře, zatímco jižní v Chorvatsku na 45°36' s.š. a 17°10' v.d. v nadmořské výšce 160 m ve městě Daruvar v Chorvatském vnitrozemí, jež odvodňuje řeka Sáva odvádějící své vody do Dunaje a dále do Černého moře.

Obě tyto oblasti leží v mírném podnebném pásu, ačkoliv Norská lokalita je na pomezí se subarktickým pásmem a Chorvatská lokalita na hranici se subtropickým pásmem.

Podle Köpennovy klasifikace klimatu se řadí Norská lokalita (Bergen) do kategorie Dfb a Chorvatská lokalita (Daruvar) do Cfb. Na rozdíl od Daruvaru leží Bergen v blízkosti Atlantského oceánu, kde převažuje odnož Severoatlantského proudu, Golfský proud, a ten zde způsobuje výrazné oteplení v porovnání s ostatními lokalitami ve stejné zeměpisné šířce. Projevuje se to dokonce v tom, že ačkoliv je Bergen severněji než Daruvar, tak je v Bergenu během zimy dosaženo vyšší minimální teploty než v Daruvaru. Oproti tomu léta jsou samozřejmě o dost chladnější, jelikož oceán zmírňuje kolísání teplot (Obr. 4).



Obrázek 4: Graf srovnání teploty v Norsku a Chorvatsku (zdroj dat: NOAA)



Obrázek 5: Graf srovnání délky dne v Norsku a Chorvatsku (zdroj dat: NOAA)

Hlavní rozdíl mezi Bergenem a Daruvarem je v délce dne během roku. Zatímco Daruvar má kolísání délky dne mezi 8,8-15,6 hodin, tak Bergen má rozpětí mezi 5,9-18,9 hodin (Obr. 5) Tato velká změna ve fotoperiodě může mít vliv na načasování začátku rašení, kterým se tato studie zabývá.

4.2. Fenologická databáze

PEP725 je pan-evropská fenologická databáze, která slouží jako jednotný přístupový bod pro fenologická data z celé Evropy (Templ et al., 2018).

PEP725 je nástupcem databáze vytvořené v rámci COST Action 725. Do databáze přispívá 32 evropských meteorologických služeb a projektových partnerů z celé Evropy. Databáze obsahuje téměř 12 milionů záznamů, pokrývá 46 růstových fází a 265 druhů rostlin (včetně odrůd) z více než 20 000 míst po celé Evropě (Templ et al., 2018).

Data jsou sbírána dobrovolníky od roku 1868 až do současnosti a poskytována národními meteorologickými službami a partnerskými organizacemi z 32 evropských zemí (Templ et al., 2018).

Databáze je přístupná veřejnosti na webové stránce www.pep725.eu a slouží pro vědecké účely, vzdělávání a environmentální monitoring. Data jsou organizována podle fenofází, jako je začátek květu, zrání plodů, rozvinutí listů a první oddělení listů. Fenofáze jsou kódovány podle BBCH škály (Meier, 1997), která standardizuje popis růstových fází rostlin. Data jsou geograficky rozložena po celé Evropě, pokrývají různé ekoregiony a jsou přístupná přes webovou aplikaci. Databáze spoléhá na kontrolu kvality provedenou partnery. Rozvíjí se vícestupňový systém kontroly kvality, který zahrnuje kroky jako kontrola úplnosti, věrohodnosti a klimatické kontroly.

Uživatelé se musí zaregistrovat na webové stránce PEP725 a souhlasit s podmínkami použití dat. Data lze stáhnout jako soubory TAR, které obsahují metadata a fenologické záznamy. Fenologická data v PEP725 databázi umožňují výzkum sezónních změn v růstu a vývoji rostlin v závislosti na klimatických podmínkách a mohou být využita například pro studium dopadů klimatické změny.

Pro účel této studie byla využita data pro buk (*Fagus*) s fenologickou fází první rozvinutí listu (first leave unfolding) označené podle BBCH číslem 11 a smrk s fenofází první oddělení

listů (first leaves seperated) s BBCH 10. Obě tyto fenofáze značí začátek vegetační sezóny vybraného druhu.

Menší problém představuje odlišné období měření u druhů i v lokalitách a zároveň některé roky v průběhu řady dochází k výpadkům pozorování a chybí zde tedy data. V Norsku je pro buk řada od roku 1970 do roku 2005, pro smrk 1964 až 2005. V Chorvatsku je doba pozorování delší, pro buk i smrk od roku 1961, resp. 1962 do roku 2015. Data zde tedy mohou být více reprezentativní.

4.3. Klimatická data

V rámci studie bylo potřeba získat data o průměrné denní teplotě ve dvou metrech nad zemí pro každý den pro roky 1961-2015 v Chorvatsku a 1964-2005 v Norsku. K tomuto účelu byla využita data z databáze ERA-5, která obsahuje data i z oblastí, kde není k dispozici meteorologická stanice s dlouhodobým měřením.

„ERA-5 je pátou generací ECMWF atmosférické reanalýzy globálního klimatu pokrývající období od ledna 1940 do současnosti“ (ECMF, 2025). ERA5 je produkován službou Copernicus Climate Change Service (C3S) v ECMWF.

ERA-5 poskytuje hodinové odhady velkého počtu atmosférických, pozemních a oceánských klimatických proměnných. Data pokrývají Zemi na 31 km mřížce a rozlišují atmosféru pomocí 137 úrovní od povrchu až do výšky 80 km. ERA5 obsahuje informace o nejistotách pro všechny proměnné při sníženém prostorovém a časovém rozlišení“ (ECMF, 2025)

Data byla stažena ze stránek KNMI Climate Explorer pro vybrané lokality v souboru RAW. Dále je bylo potřeba upravit tak, aby je bylo možné použít v programu R-studio.

4. 4. Použité fenologické modely

Za účelem modelování jarní fenologické fáze bylo potřeba vybrat fenologické modely, které dokážou predikovat jejich nástup. Na základě analýzy studií, kterým se věnuje 3. kapitola této práce, byly vybrány 2 modely, u kterých je možné porovnat jejich spolehlivost předpovědi. Oba modely vychází ze studie Baslera (2016). Jedná se o jednofázový model využívající akumulaci tepla (Forcing) a model dvoufázový sekvenční kombinující akumulaci tepla a záporných teplot (Chilling).

Model Forcing je popsán tímto vzorcem:

$$F = \sum_{t=t_0}^{DOY_{budburst}} (T_t - T_{base})$$

Kde:

- **F** – akumulovaná suma Forcing teploty
- **T_t** – průměrná denní teplota v den t
- **T_{base}** – Prahová teplota pro Forcing (např. 5°C)
- **t₀** – začátek akumulace (START DAY) Forcing teploty (např. DOY 1)
- **DOY_{budburst}** – den pozorovaného rašení v daném roce

Model Forcing-Chilling je kromě tohoto obohacen o Chilling dny.

Vzorec pro Chilling dny je popsán takto:

$$C = \sum_{t=t_{chillstart}}^{t_{chillend}} T_{cbase} \geq T_t$$

Kde:

- **C** – akumulovaná suma Chilling dní
- **T_{cbase}** – Prahová teplota pro Chilling (např. -2°C)
- **T_t** – průměrná denní teplota v den t
- **t_{chillstart}** – začátek akumulace Chilling dní (konstantní, DOY 180)
- **t_{chillend}** – konec akumulace Chilling dní = START DAY, začíná akumulace Forcing teploty

Model Forcing je tedy jednodušší, jelikož se zde se sčítal rozdíl průměrné denní teploty vzduchu a dosažené teploty pro Forcing až do pozorovaného dne rašení. Následně se určil

průměrný součet teploty Forcing (F) pro všechny roky (Meanforce) a ten se odečetl od aktuálního roku. Pokud vyšla kladná hodnota, tak model predikoval rašení později, než bylo pozorované a pokud vyšla záporná, tak predikoval na dřívější den. Tento model ignoroval období endodormance, tedy období, kdy dochází k Chillingu (viz kapitola fenologické fáze) a zahrnoval pouze ektodormanci.

Druhý model kromě Forcingu zahrnoval i Chilling teplotu, tedy průměrnou denní zápornou teplotu v průběhu předchozího podzimního a zimního období až do dne t_0 (Start Day), od kterého se začal počítat Forcing. Model je tedy sekvenční, protože se Forcing a Chilling nepočítají současně (tabulka 1). Skript sčítal všechny dny s teplotou menší nebo rovnou nastavené prahové teplotě pro Chilling a následně se tato suma Chilling dnů (C) sečetla s Forcingem (Predbud). Pak už proces probíhal stejně jako v jednofázovém modelu Forcing, kdy byla určena průměrná hodnota a predikoval se den rašení.

V rámci trénování spolehlivosti modelu byly v programu R-studio pomocí skriptu, který je uveden v příloze, kombinovány parametry t_0 a T_{base} pro model Forcing, pro model Forcing-Chilling navíc také byly kombinované prahové teploty pro Chilling. V příloze je uvedena tabulka s výsledky všech kombinací.

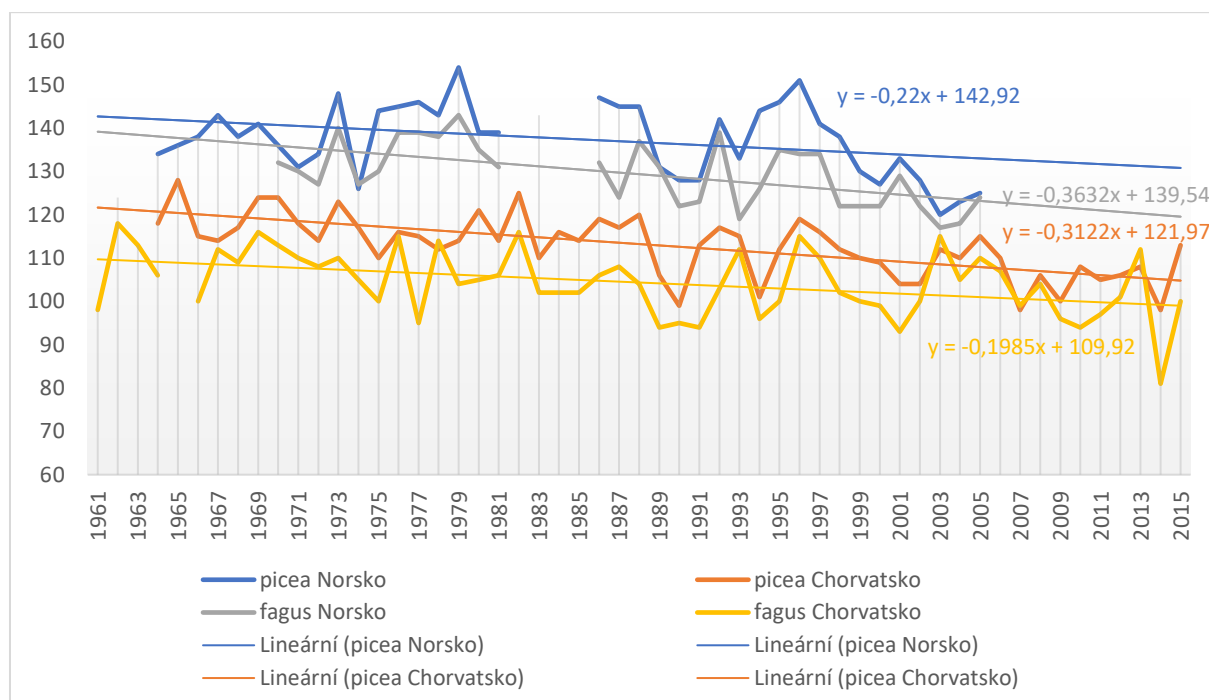
Jednotlivé hodnoty parametrů byly fitovány tak, aby se na nich dokázala vysvětlit variabilita a najít nejlepší spolehlivost. Fitované hodnoty ukazuje tabulka 2.

Start Day t_0 (DOY)	T_{base} (°C)	T_{cbase} (°C)
1, 15, 30, 45, 60, 75, 90	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	0, -2, -4, -6, -8

Tabulka 2: Fitované hodnoty parametrů určené k výzkumu

5. Výsledky

5. 1. Pozorované počátky rašení



Obrázek 6: Pozorovaná data začátku rašení pro oba druhy a obě lokality

Obrázek 6 znázorňuje pozorovaný začátek rašení pro buk a smrk v Chorvatsku a Norsku. Vzhledem k občasným chybějícím pozorováním nejsou data k dispozici po celou dobu a graf není souvislý. Faktor, který zde lze v průběhu doby vidět, je vliv globálního oteplování na začátek vegetační sezóny, kdy u všech druhů je patrný posun do dřívějšího začátku rašení. Charakteristiky jednotlivých druhů jsou popsány níže.

Buk v Norsku má nejstrmější lineární funkci, což znamená, že zde se nejvíc projevuje vliv klimatické změny na začátek rašení. Průměrný začátek rašení je mezi 120. - 130. dnem v roce s tím, že se posunul termín za dobu pozorování až o 18-20 dní. Pozorování fenologických fází rašení probíhalo v letech 1970-2005 s chybějícími údaji v letech 1982, 1984 a 1985, celkem 32 let. Tato pozorovací řada je nejkratší

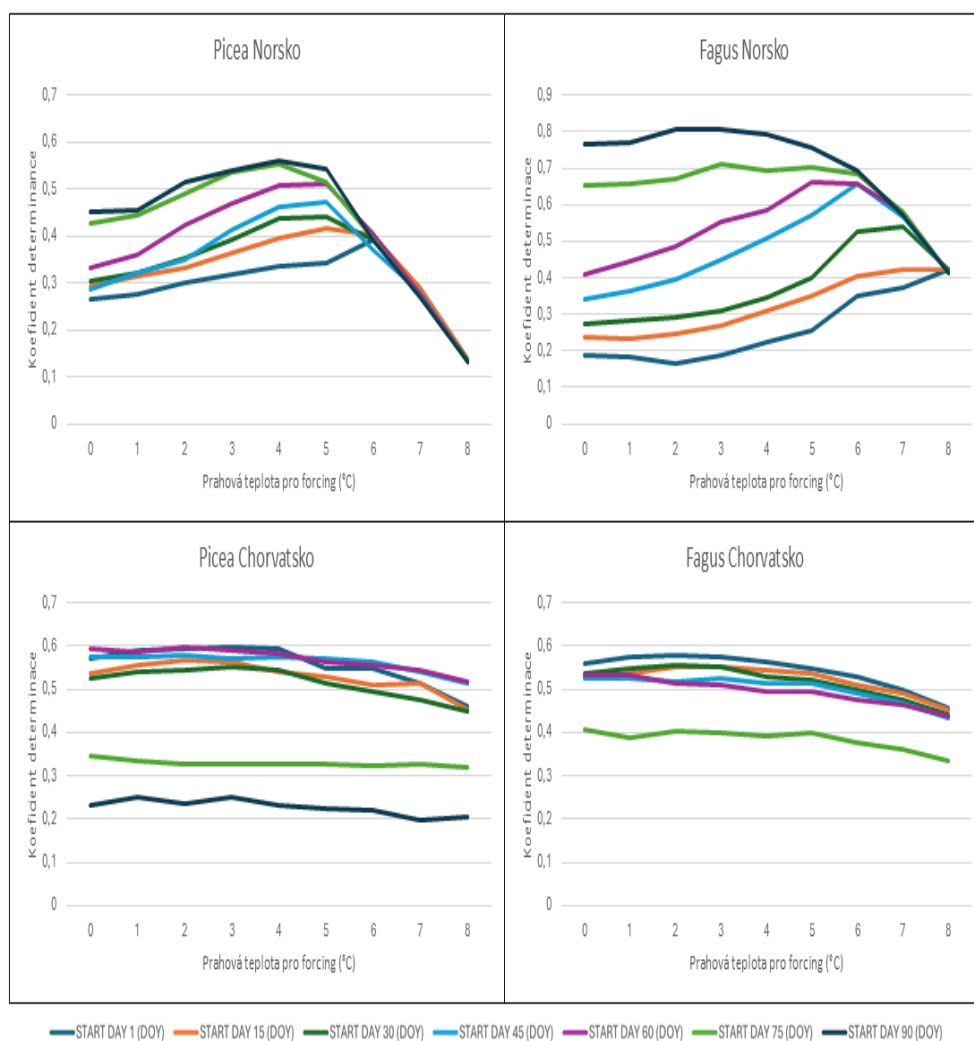
Smrk v Chorvatsku má druhou nejstrmější lineární funkci. Začátek rašení je mezi 110. - 120. dnem v roce. Za dobu pozorování se začátek vegetační sezóny posunul o 16-18 dní. Pozorování fenologických fází rašení probíhalo v letech 1962-2015 s chybějícím rokem 1963, celkem 52 let.

Smrk v Norsku má začátek rašení mezi 130. -140. dnem v roce. Jedná se tedy o nejpozději rašící jedince. Pozorování fenologických fází rašení probíhalo v letech 1964-2005 s chybějícími údaji v letech 1982,1984 a 1985, celkem 38 let. Za dobu pozorování se datum rašení posunulo o 12-14 dní.

Buk v Chorvatsku má nejmenší strmost lineární funkce. Posun ve vegetačním období je zde tedy nejmenší. Za dobu pozorování se začátek vegetační sezóny posunul o 10 dní. Rašení probíhá mezi 100. -110. dnem v roce, což je ze všech ostatních nejdříve. Pozorování fenologických fází rašení probíhalo v letech 1961-2015 s chybějícím rokem 1965, celkem 53 let. Tato pozorovací řada je nejdelší.

Zajímavé je si povšimnout, že buk vykazuje v Norsku největší změnu začátku rašení, zatímco v Chorvatsku nejmenší. Na základě pozorování lze vidět, že v dlouhodobé časové řadě dochází v Chorvatsku k dřívějšímu nástupu začátku rašení než v Norsku o 30-40 dní.

5.2. Modely počátku rašení



Obrázek 7: Vysvětlená variabilita modelu Forcing v závislosti na prahové teplotě a počátečním datu akumulace teploty

Norsko:

Picea (smrk):

Koeficient determinace roste s vyšší prahovou teplotou až do určitého bodu (cca 4–5 °C), poté klesá. Nejvyšší spolehlivost predikce je při středních prahových teplotách. Nejvyšší hodnoty koeficientu determinace jsou dosaženy u vyšších hodnot t_0 (60-90 DOY).

Fagus (buk):

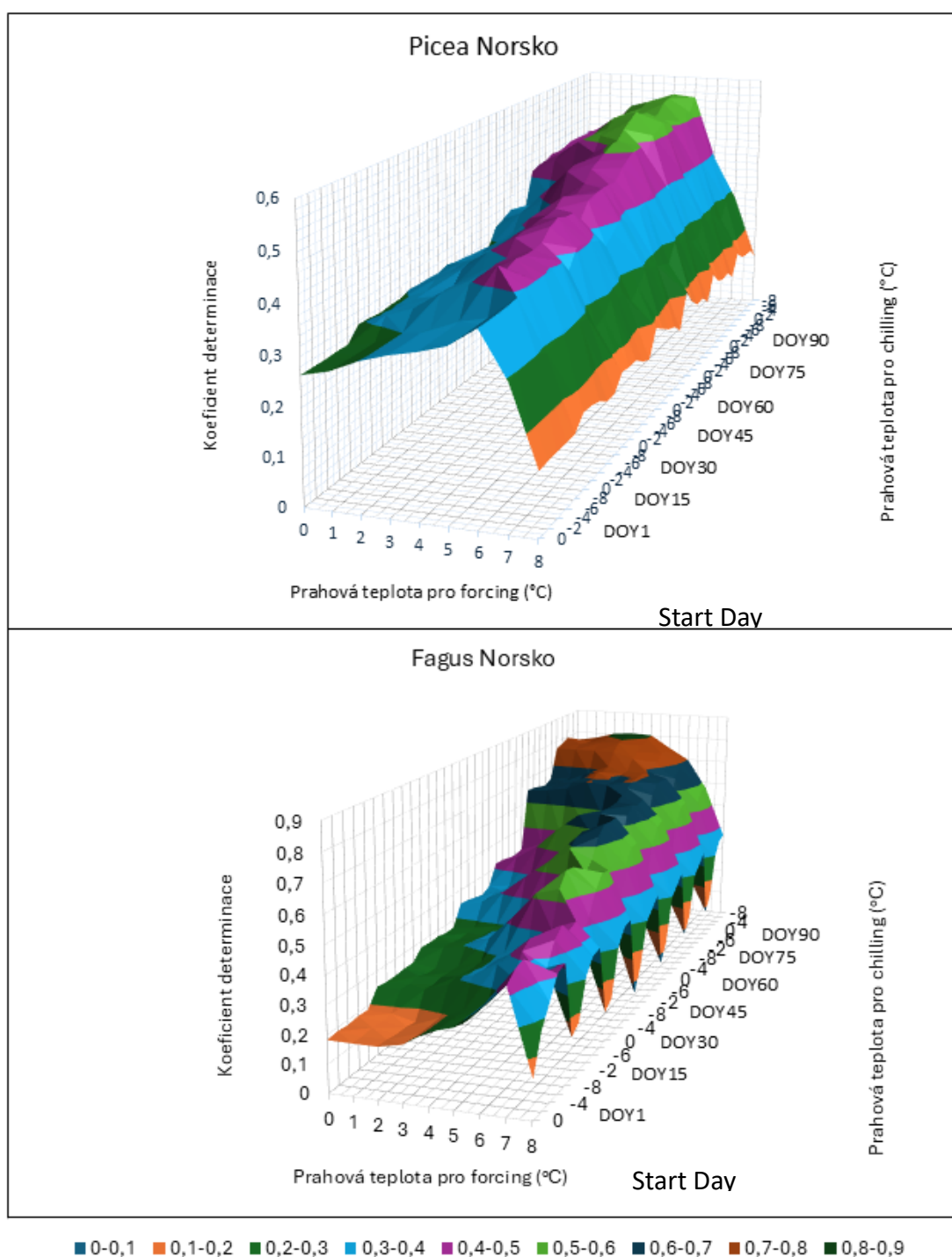
Spolehlivost predikce je obecně vyšší než u smrku. Koeficient determinace dosahuje maxima při prahové teplotě kolem 4–5 °C, podobně jako u smrku, ale hodnoty jsou vyšší. Nejvyšší hodnoty koeficientu determinace jsou rovněž dosaženy u vyšších hodnot t_0 (60-90 DOY).

Chorvatsko:**Picea (smrk):**

Spolehlivost predikce je relativně nízká a stabilní napříč různými prahovými teplotami T_{base} . Koeficient determinace se výrazně nemění. Vyšší hodnoty t_0 mají výrazně nižší koeficient determinace.

Fagus (buk):

Podobně jako u smrku v Chorvatsku, koeficient determinace je nižší než Norsku, ale vykazuje mírný pokles s rostoucí prahovou teplotou. Nižší hodnoty t_0 mají vyšší koeficient determinace.



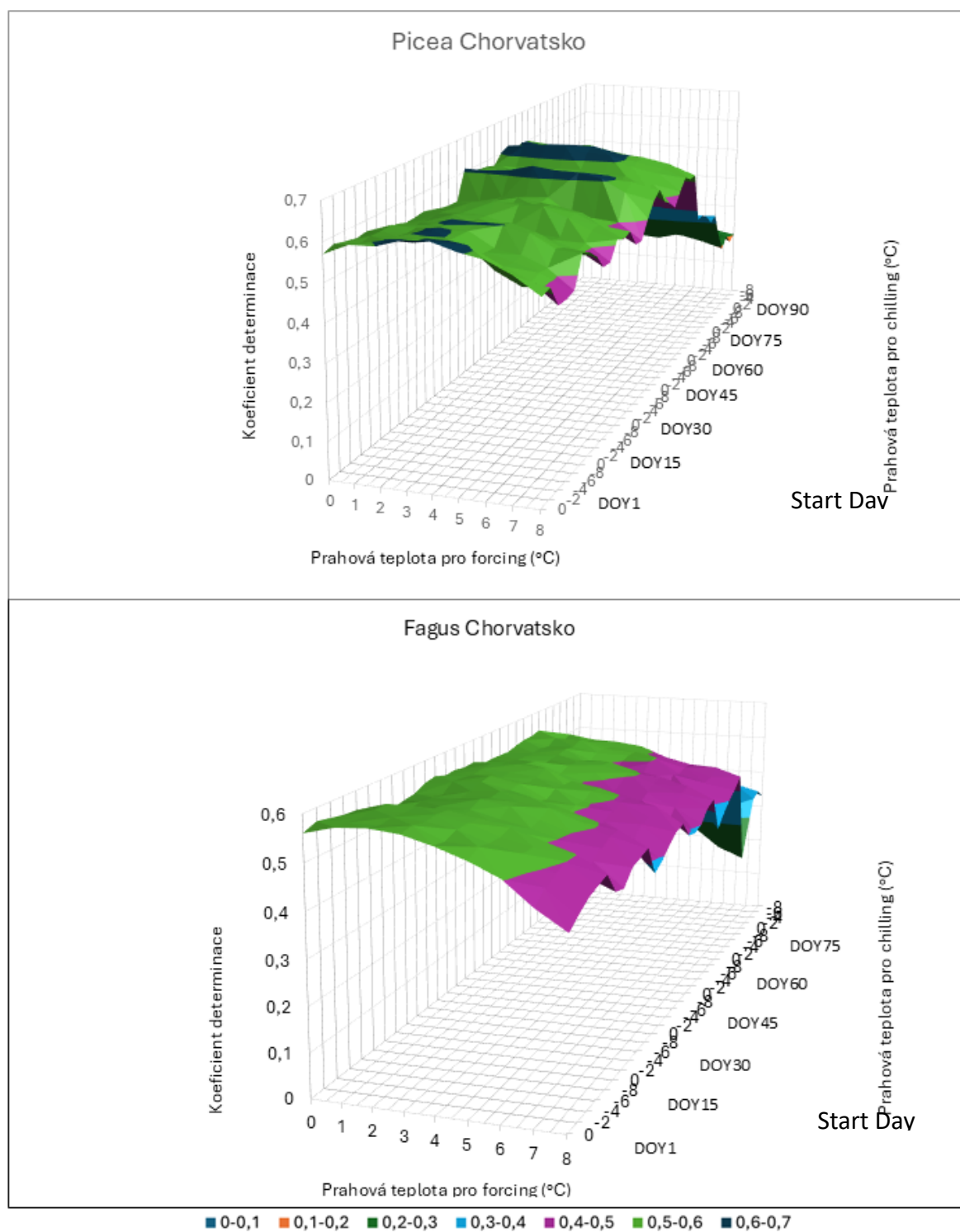
Obrázek 8: Vysvětlená variabilita modelu Forcing-Chilling v závislosti na prahových teplotách a počátku období akumulace pro severní lokalitu

Picea (smrk):

S rostoucím t_0 (od DOY 1 do DOY 90) dochází k nárůstu koeficientu determinace, což naznačuje, že pozdější data mají větší vliv na predikci modelu. Nejvyšší hodnoty koeficientu determinace se objevují kolem t_0 75–90 DOY. Koeficient determinace je nejvyšší s vyššími T_{base} (4 °C až 6 °C). Vyšší teploty tedy lépe vysvětlují fenologické změny. Vliv T_{cbase} je méně výrazný než T_{base} . Hodnoty koeficientu determinace jsou vyšší při nižších T_{cbase} (např. -8 °C až -4 °C). Celkově kombinace vyšších T_{base} , nižších T_{cbase} a vyšších hodnot DOY vede k nejvyšším hodnotám koeficientu determinace u smrku v Norsku.

Fagus (buk):

Podobně jako u Forcingu koeficient determinace postupně roste s vyššími hodnotami t_0 . Nejvyšší hodnoty koeficientu determinace jsou dosaženy při DOY 75 a DOY 90. Prahové teploty mezi 4-6 °C mají nejvyšší koeficient determinace. Nejvyšší hodnoty koeficientu determinace jsou pozorovány při nižších T_{cbase} (např. -8 °C až -4 °C). Chilling zde hraje větší roli než u smrku. Koeficient determinace je větší a více roste u t_0 a prahových teplot.



Obrázek 9: Vysvětlená variabilita modelu Forcing-Chilling v závislosti na prahových teplotách a počátku období akumulace pro jižní lokalitu

Picea (smrk):

Koeficient determinace u smrku v Chorvatsku je nejvyšší při nižších hodnotách t_0 (např. DOY 1–60), kde nejvyšší hodnoty koeficientu determinace jsou v rozmezí 0,6–0,7. Dále při středních hodnotách T_{base} (2–6 °C) a vysokých až středních T_{cbase} (0 až -4 °C).

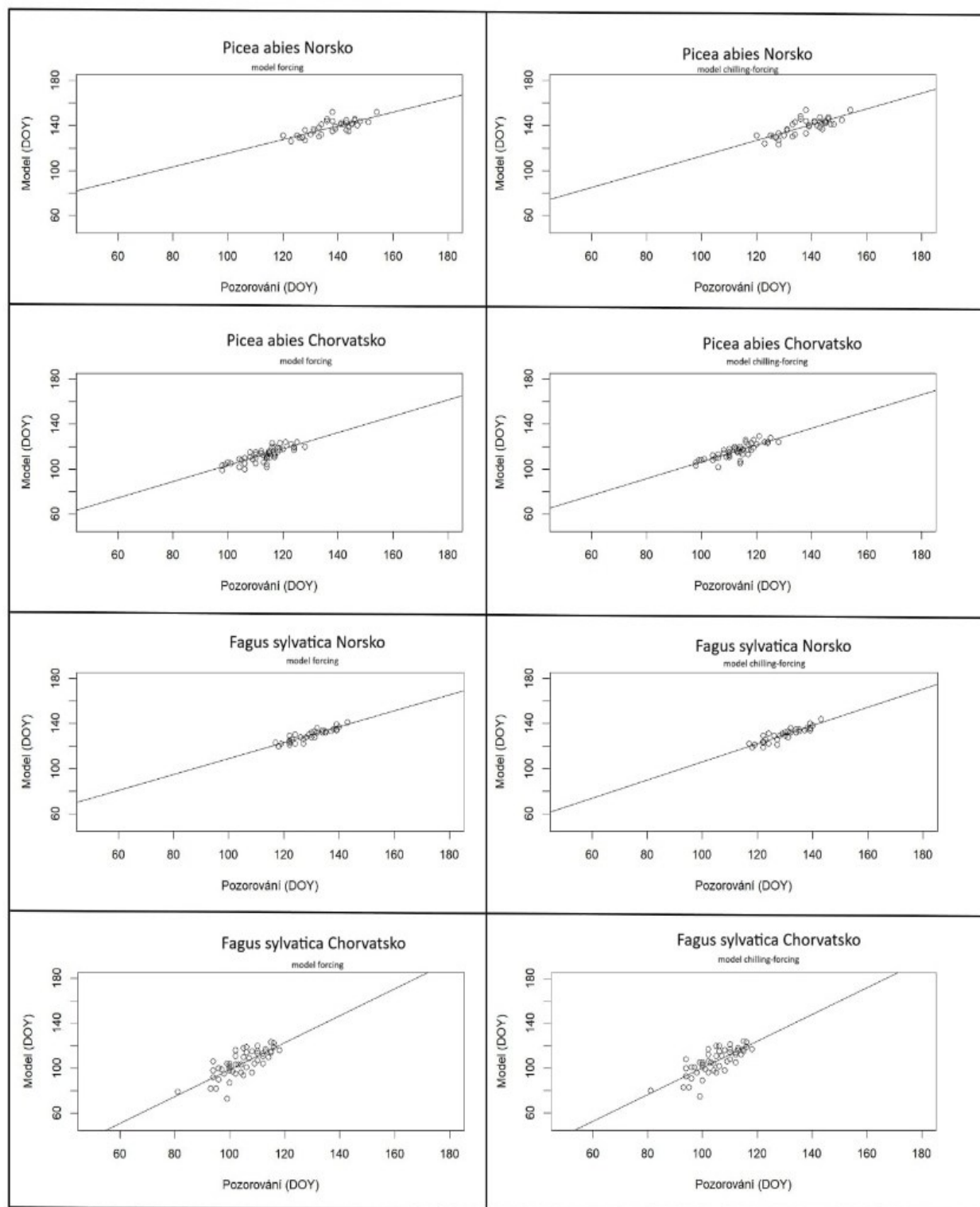
Fagus (buk):

Podobný smrku v Chorvatsku, koeficient determinace je ale menší, zejména při větší T_{base} .

Při porovnání je možné se zaměřit na více faktorů, které ovlivňují R^2 , a to jak u modelu Forcing, tak i Forcing-Chilling. Oba tyto modely mají velmi podobný průběh, viz také tabulka v příloze. Pokud se zaměříme na t_0 , tak je velmi patrný rozdíl mezi severem a jihem. Je vidět, že v Norsku mnohem lépe vychází přesnost modelů, když se t_0 nastaví na 75-90 DOY. Kdežto v Chorvatsku vychází lépe nastavení dne v roce hned na počátku roku.

Zajímavé je uvést, že v Norsku má nejlepší výsledek T_{base} okolo 4-5 °C pro všechny zvolené dny v roce s tím, že při vyšší teplotě se všechny linie t_0 sbíhají do stejného koeficientu determinace. Zároveň zejména pro buk je potřeba uvést, že linie s dřívějším t_0 mají nejvyšší koeficient determinace až při prahových teplotách 6-8°C. Chorvatsku změna T_{base} nemá takový vliv na koeficient determinace. Buk v Norsku má jednoznačně nejlepší predikci rašení ze všech ostatních.

5.3. Nejlepší predikce modelů



Obrázek 10: Přehled nejspolehlivějších predikcí

Druh	Lokalita	Model	R ²	Start Day t0(DOY)	Tbase (C°)	Tcbase (C°)	Průměrná suma Forcing teploty F (C°) zaokrouhleno	Průměrná suma Chilling dní C zaokrouhleno
Fagus sylvatica	Norsko	Forcing	0.8079	90	2	-----	160	-----
Fagus sylvatica	Norsko	Forcing- Chilling	0.8094	90	3	-6	122	1
Fagus sylvatica	Chorvatsko	Forcing	0.5797	1	2	-----	369	-----
Fagus sylvatica	Chorvatsko	Forcing- Chilling	0.5808	1	2	0	369	13
Picea abies	Norsko	Forcing	0.5615	90	4	-----	122	-----
Picea abies	Norsko	Forcing- Chilling	0.5599	75	4	-4	131	3
Picea abies	Chorvatsko	Forcing	0.5967	60	2	-----	363	-----
Picea abies	Chorvatsko	Forcing- Chilling	0.6332	60	3	0	314	35

Tabulka 3: Přehled parametrů predikcí s nejvyšším R²

Na základě použitých modelů Forcing a Forcing-Chilling pro predikci rašení buku a smrku v Norsku a Chorvatsku bylo vybráno 8 nejlepších predikcí, které jsou vyjádřeny grafy a tabulkou. Porovnáním nejlepších predikcí modelu Forcing a Forcing-Chilling zjišťujeme, že rozdíl mezi oběma modely pro stejné pozorování je zanedbatelný.

Jedině smrk v Chorvatsku předpověděl model Forcing-Chilling přesněji než Forcing o 0,05 (R²), což činí největší rozdíl. Naopak rašení smrku v Norsku jednodušší Forcing model předpověděl dokonce zanedbatelně přesněji. Již podle 3D a D2 grafů je zjevné, že buk v Norsku má nejlepší predikci, a to až R²=0,8094 pro model Forcing-Chilling.

6. Diskuse

6.1. Diskuse výsledků

Bakalářská práce potvrzuje závislost začátku vegetační sezóny na teplotě v oblastech severní a jižní Evropy. Z obrázku 5 je zřejmé, že v Chorvatsku dochází k rašení dříve, což je dané teplejším klimatem. Modely naznačují, že zde má lepší predikci nastavení t_0 brzy po zimním slunovratu a nízké T_{base} . Ukazuje se tedy, že v jižní Evropě mají kladné teploty v průběhu zimy určitý vliv na predikci rašení.

Naproti tomu v Norsku mají nejlepší predikci nastavení t_0 až na období těsně před rašením spolu s vyššími T_{base} . Dáno je to zřejmě tím, že v Norsku je během ledna velmi krátký den (obrázek 5) a až do března je také slunce velmi nízko nad obzorem, a tak se zde vysoké teploty během této doby téměř vůbec nevyskytují. Po jarní rovnodennosti je ale v Norsku den mnohem delší, takže velké oteplení na jaře má významný vliv na začátek rašení. Tuto skutečnost potvrzuje studie Zohner et al., (2020), která došla k závěru, že stromy na severu mají nižší teplotní požadavky Degree Day na rašení než na jihu.

V práci je dále naznačen trend, že vyšší T_{base} má vysoký vliv na dřívější fenologické fáze v severních oblastech. Buk (*Fagus*) v Norsku má v průběhu 32 let největší změnu ze všech ostatních pozorování (obrázek 6). Studie Zohner et al., (2020) dokládá, že zvýšení jarní teploty o 1 °C urychlí rašení buku o 3,1 dne, trend dřívějšího začátku vegetační sezóny potvrzuje i např. studie Salminen et al., (2015), která se zabývala rašením borovice lesní (*Pinus sylvestris*) ve Finsku, naznačuje, že za posledních 100 let se posunul začátek vegetační sezóny o 3-4 dny.

Dvoufázový model Forcing-Chilling v porovnání s jednofázovým modelem Forcing nevykazuje v predikci rašení téměř žádný rozdíl s výjimkou smrku v Chorvatsku. Zdá se, že má součet Chilling dní na celkovou sumu Forcing teploty F minimální vliv. Výsledky studie Liu et al. (2017), která také používala jednofázové a dvoufázové modely, ukazují, že v boreálních lesích jsou jednofázové a dvoufázové modely téměř ve shodě, zatímco v mírných šířkách jsou dvoufázové modely lepší, což je ve shodě s výsledky bakalářské práce. Autoři studie se domnívají, že v boreálních lesích jsou podmínky pro Chilling na rozdíl od mírných šířek většinou splněny.

Dá se očekávat, že v severní Evropě při vyšší zimní teplotě bude v budoucnu větší rozdíl mezi modelem Forcing a Forcing-Chilling, kdy některou zimu nebude dostatečná doba endodormance. V budoucnosti dojde zřejmě vlivem oteplování k podobnému začátku vegetační sezóny na severu i jihu Evropy. Klíčová bude v tomto případě fotoperioda, kdy při určité délce dne budou stromy rašit. Přesto ale v jižní Evropě bude tepleji a slunce výš nad obzorem.

V Norsku je nejspolehlivější Tcbase od -4 do -6 °C, takto nízké průměrné denní teploty se za celé zimní období vyskytují v průměru pouze 1-3x za rok, viz tabulka 2 a a předpokládá se, že tyto teploty budou čím dál vzácnější. Zároveň oblast Bergenu je ovlivněna Golfským proudem, a tak jsou tu takto nízké teploty obecně ojedinělé. V Chorvatsku stačí pro Chilling dny teplota 0 °C. Dřeviny jsou tak v této lokalitě více citlivé na chlad.

V Norsku i Chorvatsku raší smrk později než buk cca o 8-10 dní (obrázek 5). Z toho vyplývá, že buk musí zažít nižší akumulaci Forcing teploty.

Výzkumy Prislan et al., (2019) a Kraus et al., (2016), jejichž autoři sledovali fenologii listů i dřeva, uvádí, že buk citlivě reaguje na jarní teploty. Vyšší jarní teploty vedou k dřívějšímu rašení. Smrk je nicméně obecně méně dynamický v začátku vegetace než buk. U buku je rašení listů a začátek tvorby dřeva časově velmi podobný a často synchronizovaný (odchylky jednotky dnů). U smrku je začátek dřeva většinou o něco dřívější než rašení jehlic/letorostů. Důvod je ten, že buk je náročnější na vodu a potřebuje brzy na jaře vyrazit, kdy je půdní vláhly více.

Je potřeba uvést, že podle studie Delpierre et al. (2019) je pro začátek listové fenologie podstatné zejména suma Forcing teploty. Pro fenologii dřeva je důležitá kombinace Chilling a Forcing teploty. S tím souvisí to, že teplejší zimy a jara mohou urychlit začátek tvorby dřeva díky rychlejšímu nárůstu teplot, ale zároveň sníží množství „Chillingu“, což zvýší požadavek na jarní teplotní sumu a může začátek tvorby dřeva naopak oddálit.

6.2. Nejistoty

Žádný z modelů nedokázal zcela přesně predikovat začátek vegetační sezóny, buk v Norsku s 0,8094 R^2 je tomu nejbližší. Zároveň ale žádný model nepredikoval pod 0,5 R^2 . Zdá se tak, že závislost průběhu teploty na datu rašení je vysoká, nicméně skutečný den rašení je ovlivněn i dalšími faktory. Přesnost modelu by byla například vyšší, pokud by brala v úvahu také vliv fotoperiody a výšky slunce nad obzorem během pravého poledne.

Již v rešeršní části je nicméně uvedeno, že teploty mají největší vliv na začátek vegetační sezóny, zatímco fotoperioda a další faktory mají větší vliv v druhé polovině vegetační sezóny (Larcher, 1988). Některé druhy stromů (např. dub) raší zpravidla až při určité délce dne a vyhýbá se tím riziku jarních mrazů.

Nižší přesnost také mohou představovat roky s chladnými dny během časného jara, které pozastavují předchozí vegetační aktivitu. Celková suma Forcing teploty tak nakonec vychází větší.

Mezi hlavní nespolehlivost patří různé délky trvání řad pozorování rašení a některé chybějící roky v databázi PEP725.EU. Nejlépe predikovaná dřevina byl buk v Norsku, nicméně časová řada pozorování fenologických fází je ze všech nejkratší a to pouze 32 let. Dalším problémem je to, že řada končí v Norsku již v roce 2005 a v Chorvatsku v roce 2015. Data proto nejsou nejaktuálnější a nepodchycují trend posledních let.

Rovněž použité teplotní údaje nemusí být zcela spolehlivé, jelikož teploty nejsou staniční ale gridové. Zejména norská lokalita leží v kopcovité oblasti, a tak nemusí být na dané lokalitě stejná teplota. Vliv zde může mít reliéf, vítr od moře nebo i expozice lokality ke slunci, což může vytvářet odlišné mezoklima.

Míru nejistoty modelu také ovlivňuje skutečnost, že byly vybrány pouze 2 dřeviny a 2 lokality, což poukazuje na nižší reprezentativnost dat. Zejména více lokalit by znamenalo možnost lépe definovat prostředí severní a jižní Evropy. Některé studie nicméně tuto věc učinili. Například již výše zmíněná studie Salminen, Jalkalen (2015) sledovala rašení pupenů borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) v severním Finsku v letech 2001–2003, 2008–2010 a 2011–2013 na dvou lokalitách vzdálených cca 250 km. Bylo testováno několik modelů rašení pupenů, včetně modelů založených na akumulaci teploty (Forcing), modelů s efektem chladu (Chilling)

a jednoduchého modelu spuštěného fixním datem (Day-Length, DL). Nejlepší shodu s pozorovanými daty poskytl jednoduchý model spuštěný fixním datem (DL) a nejjednodušší model s efektem chladu (IA). Oba dosáhly RMSE 1,6 až 4 dny v závislosti na lokalitě. Modely lépe předpovídaly rašení v letech s prudkým přechodem z chladného na teplé počasí. Při pozvolném oteplování byla chyba modelů větší.

Žádný z testovaných modelů nelze jednoznačně upřednostnit jako nejlepší pro predikci rašení listů napříč druhy a lokalitami. Zdá se, že hlavním faktorem je akumulace teploty na jaře v severní lokalitě, zatímco v jižní lokalitě se jedná o akumulaci teploty po celou zimu. Modelová komplexita nemusí vždy znamenat vyšší přesnost; někdy je vhodnější jednodušší model. Nedostatek dat o fyziologických procesech (např. indukce dormance na podzim) komplikuje kalibraci komplexních modelů.

7. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval jarními fenofázemi buku a smrku na dvou lokalitách ležících blízko jižního a severního okraje areálů obou dřevin. Výsledky této bakalářské práce ukazují solidní predikční schopnost modelů rašení listů a jehlic. Ukazuje se, že vývoj teploty v zimních měsících má značný vliv na začátek rašení v mírných zeměpisných šířkách.

S pokračujícím oteplováním klimatu se může stát nedostatečnou akumulace záporných teplot přerušující endodormanci (tzv. Chilling) v severní Evropě, což by mohlo zvýšit význam fotoperiody a dalších faktorů při určování začátku vegetačního růstu. V porovnání s podobnými studiemi modely naznačují, že změny v jarní fenologii budou mít značné ekologické dopady na severní ekosystémy, včetně synchronizace data rašení mezi nízkými a vysokými zeměpisnými šířkami.

8. Zdroje

8.1. Zdroje dat

Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). *Daily fields*. [online]. Dostupné z: <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> [cit. 15. 11. 2024]

GeoSphere Austria. (n.d.): Pan European Phenology Project (PEP725). *Data selection and download* [online]. Dostupné z: <http://www.pep725.eu> [cit. 15. 11. 2024]

National Centers for Environmental Information (2024). Climate Data Online: Dataset Discovery. [online]. Dostupné z: <https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/datasets> [cit. 27. 04. 2025]

8.2. Seznam použité literatury

ANDERSON, D., & BURNHAM, K. (2002). *Model selection and multi-model inference*. Vydání 2. New York: Springer, 488 s.

ANDERSON, J. T., & SONG, B. H. (2020). *Plant adaptation to climate change—Where are we?*. Journal of Systematics and Evolution, 58(5), 533-545. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jse.12649>

BARTOŠOVÁ, L. (2024). *Fenologický výzkum jako ukazatel změn počasí a podnebí*. Živa, 72(6), 324–326. Dostupné z: <https://ziva.avcr.cz/files/ziva/pdf/fenologicky-vyzkum-jako-ukazatel-zmen-pocasi-a-pod.pdf>

BASLER, D. (2016). *Evaluating phenological models for the prediction of leaf-out dates in six temperate tree species across central Europe*. Agricultural and Forest Meteorology, 217, 10-21. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.007>

BOUND, S. A., FOO, E., GÉLINAS-MARION, A., NICHOLS, D. S., & NISSEN, R. (2022). *The Impact of Dormancy Breakers on Hormone Profiles, Fruit Growth and Quality in Sweet Cherry*. Agriculture, 12(2), 270. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020270>

- CORNIC, G. (2025). *Effects of temperature on photosynthesis*. Encyclopedia of the Environment. [online]. Dostupné z: <https://www.encycopedie-environnement.org/en/life/effects-temperature-on-photosynthesis/> [cit. 2025-04-27].
- DELPIERRE, N., DUFRÊNE, E., SOUDANI, K., ULRICH, E., CECCHINI, S., BOÉ, J., & FRANÇOIS, C. (2009). *Modelling interannual and spatial variability of leaf senescence for three deciduous tree species in France*. Agricultural and Forest Meteorology, 149(6-7), 938-948. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.11.014>
- DELPIERRE N., LIREUX S., HARTIG F., CAMARERO J.J., ... & RATHGEBER C.B.K. (2019). *Chilling and Forcing temperatures interact to predict the onset of wood formation in Northern Hemisphere conifers*. Global Change Biology, 25(3), 1089-1105. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/qcb.14539>
- ETTINGER, A. K., BUONAIUTO, D. M., CHAMBERLAIN, C. J., MORALES-CASTILLA, I., & WOLKOVICH, E. M. (2021). *Spatial and temporal shifts in photoperiod with climate change*. New Phytologist, 230(2), 462-474. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/nph.17172>
- Evropské centrum pro střednědobé předpovědi počasí (2025). About us. [online]. Dostupné z: <https://www.ecmwf.int/en/about> [cit. 2025-04-08].
- FENOFAZE. (2025). *Dlouhodobé řady*. [online]. Dostupné z: <https://www.fenofaze.cz/fenologicke-faze/> [cit. 2025-04-08].
- FIELD, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Vydání 6. University of Sussex: Sage publications limited, 1144 s.
- HÁJKOVÁ, L., VOŽENÍLEK, V., TOLASZ, R., KOHUT, M., MOŽNÝ, M., NEKOVÁŘ, J., NOVÁK, M., RICHTEROVÁ, D., STŘÍŽ, M., VÁVRA, A., VONDRÁKOVÁ, A. (2012). *Atlas fenologických poměrů Česka*. Vydání 1. Praha: ČHMÚ, 311 s.
- HE, T., DAI, X., LI, W., ZHOU, J., ZHANG, J., LI, C., DAI, T., LI, W., LU, H., YE, Y., XU, L., & JIANG, X. (2023). *Response of net primary productivity of vegetation to drought: A case study of Qinba Mountainous area, China (2001–2018)*. Ecological Indicators, 150, 110241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110148>

- HEBERLING, J. M., & MUZIKA, R. M. (2023). *Not all temperate deciduous trees are leafless in winter: The curious case of marcescence*. *Ecosphere*, 14(3), e4410. Dostupné z: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ecs2.4410>.
- HESS, D. (1983). *Fyziologie rostlin*. Vydání 1. Praha: Academia, 348 s.
- HODGSON, J. A., THOMAS, C. D., OLIVER, T. H., ANDERSON, B. J., BRERETON, T. M., & CRONE, E. E. (2011). *Predicting insect phenology across space and time*. *Global Change Biology*, 17(3), 1289-1300. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02308.x>
- HUANG J-G., MA Q., ROSSI S., BIONDI F., DESLAURIERS A., ... & ZIACO E. (2020). *Photoperiod and temperature as dominant environmental drivers triggering secondary growth resumption in Northern Hemisphere conifers*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(34), 20645-20652. Dostupné z: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2007058117>
- CHAI, T., & DRAXLER, R. R. (2014). *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature*. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- CHMIELEWSKI, F. M., & RÖTZER, T. (2001). *Response of tree phenology to climate change across Europe*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(2), 101-112. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00233-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00233-7)
- CHUINE, I. (2000). *A unified model for budburst of trees*. *Journal of theoretical biology*, 207(3), 337-347. Dostupné z: <https://doi.org/10.1006/jtbi.2000.2178>
- CHUINE, I., COUR, P., & ROUSSEAU, D. D. (1999). *Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: implications for tree phenology modelling*. *Plant, Cell & Environment*, 22(1), 1-13. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1365-3040.1999.00395.x>
- IPCC (2023). *Změna klimatu 2023: Syntézní zpráva*. Příspěvek pracovních skupin I, II a III ke Šesté hodnotící zprávě Mezivládního panelu pro změnu klimatu [Core Writing Team, H. Lee a J. Romero (eds.)]. IPCC, Ženeva, Švýcarsko, 35–115. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/longer-report/>
- JIANG, P., YAN, J., LIU, R., ZHANG, X., & FAN, S. (2023). *Patterns of deep fine root and water utilization amongst trees, shrubs and herbs in subtropical pine plantations with seasonal*

droughts. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1275464. Dostupné z:

<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1275464>

KADUK, J., & HEIMANN, M. (1996). *A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models*. *Climate Research*, 6(1), 1-19. Dostupné z: <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v06/n1/p1-19/>

KARAMUZ, E., & ROMANOWICZ, R. J. (2021). *Temperature Changes and Their Impact on Drought Conditions in Winter and Spring in the Vistula Basin*. *Water*, 13(14), 1973. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w13141973>

KEENAN, T. F., & RICHARDSON, A. D. (2015). *The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology: implications for predictive models*. *Global Change Biology*, 21(7), 2634-2641. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/gcb.12890>

KNORR, W., KAMINSKI, T., SCHOLZE, M., GOBRON, N., PINTY, B., GIERING, R., & MATHIEU, P. P. (2010). *Carbon cycle data assimilation with a generic phenology model*. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(4). Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009JG001119>

KOLÁŘ, J. (2006). *Biologické hodiny rostlin: Jak se rostliny orientují v čase během dne a roku*. Vydání 1. Praha: Academia, 108 s.

KORZUKHIN, M. D., TER-MIKAELIAN, M. T., & WAGNER, R. G. (1996). *Process versus empirical models: which approach for forest ecosystem management?*. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(5), 879-887. Dostupné z: <https://doi.org/10.1139/x26-096>

KRAUS, C., ZANG, C., & MENZEL, A. (2016). *Elevational response in leaf and xylem phenology reveals different prolongation of growing period of common beech and Norway spruce under warming conditions in the Bavarian Alps*. *European Journal of Forest Research*, 135, 1011-1023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0990-7>

KRINNER, G., VIOVY, N., DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N., OGÉE, J., POLCHER, J., FRIEDLINGSTEIN, P., ... & PRENTICE, I. C. (2005). *A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system*. *Global biogeochemical cycles*, 19(1). Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003GB002199>

KUBÁT, K. (2002). *Klíč ke květeně České republiky*. Vydání 1. Praha: Academia, 927 s.

- KUBÍKOVÁ, Z., SMEJKALOVÁ, H., KADAŇKOVÁ, P., HUTYROVÁ, H., & PELIKÁN, J. (2019). *Využití fenologické stupnice BBCH a jejích modifikací při hodnocení vývoje svazenky*. Rožnovský J, Litschmann T. Fenologie, její význam a užití. Praha: VÚMOP v.v.i., Dostupné z: <http://www.cbks.cz/SbornikModra2019/Kubikova.pdf>
- LANG, W., CHEN, X., QIAN, S., LIU, G., & PIAO, S. (2019). *A new process-based model for predicting autumn phenology: how is leaf barvení listí controlled by photoperiod and temperature coupling?* Agricultural and Forest Meteorology, 268, 124-135. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192319300061>
- LARCHER, W. (1988). *Fyziologická ekologie rostlin*. Vydání 1. Praha: Academia, 368 s.
- LINKOSALO, T., HÄKKINEN, R., & HÄNNINEN, H. (2006). *Models of the spring phenology of boreal and temperate trees: is there something missing?* Tree physiology, 26(9), 1165-1172. Dostupné z: <https://academic.oup.com/treephys/article-abstract/26/9/1165/1658715>
- LIU, G., XIANG, A., WAN, Z., LV, H., LIU, H., HU, Z., & CHEN, L. (2023). *Phenological changes of woody plants in the southern and northern regions of Nanling Mountains and their relationship with climatic factors*. Forests, 14(12), 2363. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/12/2363>
- LIU, Q., FU, Y. H., LIU, Y., JANSSENS, I. A., & PIAO, S. (2018). *Simulating the onset of spring vegetation growth across the Northern Hemisphere*. Global Change Biology, 24(3), 1342-1356. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.13954>
- LV, Y., ZHANG, L., LI, P., HE, H., REN, X., XIE, Z., ... & WANG, X. (2023). *Improving Phenology Representation of Deciduous Forests in the Community Land Model: Evaluation and Modification Using Long-Term Observations in China*. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 15(10), e2023MS003655. Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2023MS003655>
- MARCHAND, L. J., GRIČAR, J., ZUCCARINI, P., DOX, I., MARIËN, B., VERLINDEN, M., ... & CAMPIOLI, M. (2025). *No winter halt in below-ground wood growth of four angiosperm deciduous tree species*. Nature Ecology & Evolution, 1-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02602-6>

MCMASTER, G. S., & WILHELM, W. W. (1997). *Growing degree-days: one equation, two interpretations*. Agricultural and Forest Meteorology, 87(4), 291-300.

[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)

MEIER, U. et al. (1997). *Growth stages of Mono- and Dicotyledonous plants: BBCH Monograph*. Berlin: Blackwell Wissenschafts-Verlag, 11622 s.

MO, Y., ZHANG, J., JIANG, H., & FU, Y. H. (2023). *A comparative study of 17 phenological models to predict the start of the growing season*. Frontiers in Forests and Global Change, 5, 1032066. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1032066>

NASH, J. E., & SUTCLIFFE, J. V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles*. Journal of Hydrology, 10(3), 282-290. Dostupné z:

[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

PIAO, S., FRIEDLINGSTEIN, P., CIAIS, P., VIOVY, N., & DEMARTY, J. (2007). *Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades*. Global Biogeochemical Cycles, 21(3). Dostupné z:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006GB002888>

POTOPOVÁ, V., BORONEANT, C., MOZNY, M., & SOUKUP, J. (2011). *Driving role of snow cover on soil moisture and drought developing during the growing season in the Czech Republic*. Climate Research, 50(3), 287–302. Dostupné

z: <https://www.researchgate.net/publication/287994066>

POUDEL, B. C., SATHRE, R., GUSTAVSSON, L., BERGH, J., LUNDSTRÖM, A., & HYVÖNEN, R. (2011). *Effects of climate change on biomass production and substitution in north-central Sweden*. Biomass and Bioenergy, 35(10), 4340-4355. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411004351>

PRISLAN, P., GRIČAR, J., ČUFAR, K., DE LUIS, M., MERELA, M., & ROSSI, S. (2019). *Growing season and radial growth predicted for Fagus sylvatica under climate change*. Climatic Change, 153, 181-197. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02374-0>

RIGBY, J. R., & PORPORATO, A. (2008). *Spring frost risk in a changing climate*. Geophysical Research Letters, 35(12). Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2008GL033955>

- DICK, R. (2024). *Day Light versus Night Dark*. Harrowsmith Magazine. Dostupné z: <https://www.harrowsmithmag.com/44451/day-light-versus-night-dark>
- SALMINEN, H., & JALKANEN, R. (2015). *Modeling of bud break of Scots pine in northern Finland in 1908–2014*. *Frontiers in Plant Science*, 6(MAR), 104. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2015.00104/full>
- Sdružení TEREZA. (2008). *Metodika pro fenologická pozorování v programu GLOBE*. Praha: Sdružení TEREZA, 50 s. Dostupné z: <https://globe-czech.cz/files/userfiles/Metodika.pdf>
- SEIDL, R., THOM, D., KAUTZ, M., MARTIN-BENITO, D., PELTONIEMI, M., VACCHIANO, G., ... & REYER, C. P. (2017). *Forest disturbances under climate change*. *Nature Climate Change*, 7(6), 395-402. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- SHI, S., YANG, P., VRIELING, A., & TOL, C. V. D. (2025). *Vegetation optimal temperature modulates global vegetation season onset shifts in response to warming climate*. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02186-4>
- SCHWARTZ, M. D. (2024). *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Vydání 3. University of Wisconsin: SpringerCham, 644 s.
- TEMPL, B., KOCH, E., BOLMGREN, K., UNGERSBÖCK, M., PAUL, A., SCHEIFINGER, H., ... & ZUST, A. (2018). *Pan European Phenological database (PEP725): a single point of access for European data*. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1109-1113. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/S00484-018-1512-8>
- TOLASZ, R., MÍKOVÁ, T., VALERIÁNOVÁ, A., & VOŽENÍLEK, V. (2015). *Atlas podnebí Česka*. Univerzita Palackého v Olomouci: ČHMU, 255 s.
- VILHAR, U., DE GROOT, M., ZUST, A., SKUDNIK, M., & SIMONČIČ, P. (2018). *Predicting phenology of European beech in forest habitats*. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 11(1), 41. Dostupné z: <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor1820-010>
- WILLMOTT, C. J., & MATSUURA, K. (2005). *Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance*. *Climate research*, 30(1), 79-82. Dostupné z: <https://doi.org/10.3354/cr030079>

- WIPF, S., STOECKLI, V., & BEBI, P. (2009). *Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing*. Climatic Change, 94(1), 105-121. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9546-x>
- WU, C., PENG, J., CIAIS, P., PEÑUELAS, J., WANG, H., BEGUERÍA, S., ... & GE, Q. (2022). *Increased drought effects on the phenology of autumn leaf barvení listí*. Nature Climate Change, 12(10), 943-949. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01464-9>
- XIE, Y., WANG, X., WILSON, A. M., & SILANDER JR, J. A. (2018). *Predicting autumn phenology: how deciduous tree species respond to weather stressors*. Agricultural and Forest Meteorology, 250, 127-137. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192317306792>
- XU, Z., LIU, Q., DU, W., ZHOU, G., QIN, L., & SUN, Z. (2021). *Modelling leaf phenology of some trees with accumulated temperature in a temperate forest in northeast China*. Forest Ecology and Management, 489, 119085. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112721001742>
- ZOHNER, C. M., MIRZAGHOLI, L., RENNER, S. S., MO, L., REBINDAINE, D., BUCHER, R., ... & CROWTHER, T. W. (2023). *Effect of climate warming on the timing of autumn leaf barvení listí reverses after the summer solstice*. Science, 381(6653), eadf5098. Dostupné z: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.adf5098>
- ZOHNER, C. M., MO, L., SEBALD, V., & RENNER, S. S. (2020). *Leaf-out in northern ecotypes of wide-ranging trees requires less spring warming, enhancing the risk of spring frost damage at cold range limits*. Global Ecology and Biogeography, 29(6), 1065-1072. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/geb.13088>
- ZWEIFEL, R., STERCK, F., BRAUN, S., BUCHMANN, N., EUGSTER, W., GESSLER, A., ... & ETZOLD, S. (2021). *Why trees grow at night*. New Phytologist, 231(6), 2174-2185. Dostupné z: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.17552>

9. Přílohy

9.1. Tabulka zobrazující výsledky aplikace modelů Forcing a Forcing-Chilling při různých parametrech

Start Day 1 DOY

Picea Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0,2653	0.2759	0.3005	0.3167	0.3346	0.3442	0.3923	0.2874	0.1342
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0,264	0.2774	0.3027	0.32	0.3322	0.3493	0.3882	0.2937	0.1322
-2		0.264	0.2759	0.3005	0.32	0.3322	0.3474	0.3882	0.2991	0.1341
-4		0.264	0,2759	0.3005	0.32	0.3322	0.3474	0.3882	0.2991	0.1341
-6		0.2653	0,2759	0.3005	0.32	0.3322	0.3474	0.3894	0.2991	0.1333
-8		0.2653	0.2759	0.3005	0.3167	0.3346	0.3474	0.3923	0.2893	0.1333
Fagus Norsko	Tbase (C°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.1866	0.1826	0.1636	0.1888	0.224	0.2568	0.3522	0.3714	0.4223
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (C°)										
0		0.1824	0.1814	0.1808	0.198	0.2501	0.2756	0.3453	0.4305	0.1384
-2		0.1872	0.1783	0.1785	0.1908	0.2302	0.2619	0.3482	0.4611	0.2692
-4		0.183	0.1829	0.1717	0.188	0.2304	0.2586	0.3494	0.4706	0.3386
-6		0.1888	0.179	0.1709	0.1867	0.2282	0.26	0.3495	0.3866	0.4089
-8		0.1866	0.1826	0.1636	0.1875	0.2254	0.2607	0.351	0.3713	0.4214
Picea Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.5706	0.5913	0.5932	0.5961	0.5951	0.5487	0.5476	0.5153	0.4598

Tcbase (°C)	Model Forcing-Chilling									
0		0.5701	0.5979	0.6	0.6196	0.6226	0.603	0.5902	0.5592	0.5158
-2		0.5811	0.5864	0.6013	0.6004	0.6105	0.6058	0.5507	0.5173	0.5221
-4		0.5733	0.5919	0.5959	0.5982	0.5974	0.5644	0.5462	0.5156	0.463
-6		0.5661	0.5914	0.5905	0.607	0.5967	0.5602	0.5429	0.5226	0.4622
-8		0.5714	0.5933	0.5917	0.5981	0.5939	0.5564	0.5454	0.518	0.4679
Fagus Chorvatsko	Tbase (C°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.561	0.5739	0.5797	0.5732	0.5632	0.5494	0.5308	0.4983	0.4571
Tcbase (C°)	Model Forcing-Chilling									
0		0.5607	0.577	0.5808	0.5742	0.5563	0.533	0.5041	0.4508	0.409
-2		0.5723	0.5744	0.5733	0.5789	0.5516	0.5467	0.5134	0.4767	0.4298
-4		0.5662	0.5715	0.5781	0.5736	0.5629	0.5394	0.5248	0.4914	0.4473
-6		0.5602	0.5759	0.5748	0.5767	0.5635	0.5389	0.5244	0.5013	0.4564
-8		0.5581	0.5764	0.5757	0.573	0.5615	0.5463	0.5236	0.502	0.4639

Start Day 15 DOY

Picea Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.2921	0.3135	0.3313	0.3633	0.3971	0.4151	0.4016	0.2898	0.1395
Tcbase (°C)	Model Forcing-Chilling									
0		0.2934	0.3181	0.3364	0.373	0.3953	0.4381	0.4001	0.2928	0.1605
-2		0.2922	0.311	0.3318	0.3723	0.3986	0.4194	0.4003	0.3058	0.158
-4		0.2893	0.3132	0.3339	0.3711	0.3994	0.4274	0.4008	0.3	0.151
-6		0.2923	0.3124	0.3258	0.3636	0.401	0.4228	0.3964	0.2948	0.1339
-8		0.2933	0.3135	0.3268	0.3636	0.399	0.4219	0.404	0.2884	0.1341

Fagus Norsko	Tbase (C°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.2356	0.2325	0.2469	0.2682	0.3079	0.3527	0.4062	0.4216	0.4226
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (C°)										
0		0.2436	0.2436	0.2529	0.2798	0.3205	0.3695	0.4227	0.3754	0.1454
-2		0.2389	0.2402	0.2466	0.2863	0.3122	0.3703	0.4447	0.4485	0.1703
-4		0.2391	0.2465	0.2528	0.275	0.3117	0.364	0.4244	0.48	0.3099
-6		0.2422	0.2327	0.249	0.2721	0.3102	0.3489	0.4296	0.4403	0.3589
-8		0.2422	0.2307	0.2453	0.2716	0.3141	0.3482	0.4105	0.4519	0.3644
Picea Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.5383	0.5554	0.566	0.5619	0.5415	0.5307	0.5093	0.5148	0.4543
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0.5535	0.5768	0.5771	0.6055	0.6025	0.6013	0.5869	0.552	0.5466
-2		0.5484	0.5569	0.5732	0.5865	0.5849	0.5932	0.5736	0.541	0.5343
-4		0.5509	0.5601	0.5689	0.5707	0.5712	0.5424	0.5291	0.5114	0.5093
-6		0.5405	0.5557	0.5748	0.568	0.5492	0.5318	0.5275	0.5053	0.4675
-8		0.5421	0.5598	0.5662	0.5627	0.5396	0.5249	0.5202	0.5114	0.4654
Fagus Chorvatsko	Tbase (C°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.5344	0.538	0.5514	0.55	0.5452	0.5351	0.5089	0.4921	0.4536
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (C°)										
0		0.5337	0.546	0.5547	0.5495	0.5411	0.5211	0.4848	0.4422	0.4127
-2		0.5408	0.5415	0.552	0.5495	0.5324	0.5182	0.4978	0.4579	0.4046
-4		0.5248	0.5454	0.5533	0.5605	0.5493	0.5233	0.5004	0.4728	0.4359
-6		0.5306	0.5428	0.5453	0.5509	0.5462	0.5381	0.513	0.4864	0.4424
-8		0.5343	0.5369	0.5495	0.5546	0.5469	0.5283	0.5072	0.4862	0.4503

Start Day 30 DOY

Picea Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.3034	0.3202	0.3534	0.3914	0.4377	0.4421	0.3929	0.2778	0.1368
	Model Forcing- Chilling									
0		0.302	0.3285	0.3539	0.397	0.4306	0.426	0.3711	0.2565	0.1655
-2		0.2998	0.3248	0.3589	0.3843	0.4342	0.448	0.4074	0.2636	0.1612
-4		0.3004	0.3248	0.3538	0.3955	0.4323	0.4568	0.4046	0.2906	0.1607
-6		0.2988	0.3295	0.3528	0.3975	0.4373	0.4477	0.3973	0.2786	0.1428
-8		0.3057	0.3218	0.3564	0.3918	0.4359	0.445	0.3877	0.2727	0.1322
Fagus Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.2741	0.2846	0.2909	0.3108	0.3448	0.4001	0.5277	0.5398	0.4222
	Model Forcing- Chilling									
0		0.279	0.2871	0.3022	0.3377	0.421	0.5163	0.5399	0.357	0.1093
-2		0.2739	0.283	0.2992	0.3188	0.3538	0.448	0.5902	0.428	0.1352
-4		0.2769	0.2742	0.2942	0.3269	0.3466	0.3926	0.5841	0.5083	0.3052
-6		0.2698	0.2789	0.2915	0.3086	0.346	0.4022	0.5173	0.5528	0.3579
-8		0.2698	0.2789	0.2926	0.3125	0.3396	0.3998	0.5278	0.5432	0.3641
Picea Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.5255	0.5415	0.5432	0.5511	0.5454	0.5139	0.4947	0.4772	0.4491
	Model Forcing- Chilling									
0		0.5463	0.5646	0.5813	0.5892	0.5846	0.5853	0.5611	0.532	0.5119
-2		0.5256	0.5442	0.5617	0.5723	0.575	0.5769	0.5614	0.5331	0.498

-4		0.5288	0.5484	0.5581	0.5496	0.5588	0.5614	0.5482	0.4977	0.5067
-6		0.5265	0.5402	0.5474	0.5627	0.5533	0.5165	0.5225	0.4932	0.4572
-8		0.5241	0.5307	0.5464	0.5536	0.5566	0.5119	0.5019	0.5002	0.4538
Fagus Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.5381	0.547	0.5566	0.5532	0.5291	0.5206	0.4986	0.477	0.4423
	Model Forcing- Chilling									
0		0.5478	0.5562	0.56	0.5451	0.5233	0.5025	0.4705	0.4485	0.3787
-2		0.5528	0.5536	0.5631	0.5492	0.5166	0.5072	0.4752	0.4383	0.3937
-4		0.5439	0.5491	0.5477	0.5378	0.5304	0.5046	0.4858	0.461	0.4166
-6		0.5459	0.5538	0.5492	0.5409	0.5275	0.5173	0.4953	0.4665	0.4347
-8		0.5413	0.5549	0.5578	0.5534	0.5252	0.5135	0.4944	0.479	0.4395

Start Day 45 DOY

Picea Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.288 2	0.320 2	0.349	0.413 7	0.462 6	0.472 2	0.371 3	0.280 3	0.1313
	Model Forcing - Chilling									
0		0.300 1	0.321 1	0.356 5	0.414 1	0.44	0.421 1	0.364 1	0.245 9	0.19
-2		0.288 1	0.328 6	0.358 6	0.412 3	0.456 6	0.451 6	0.382 4	0.264 5	0.1736
-4		0.293 9	0.314 7	0.357 1	0.413 3	0.447 6	0.457 1	0.401 3	0.294 1	0.1586
-6		0.290 5	0.316 6	0.355 7	0.415	0.444 1	0.458 8	0.382 1	0.280 2	0.1501
-8		0.285 7	0.316 6	0.355 3	0.418 3	0.456 1	0.458 3	0.371 2	0.276 9	0.1274

Fagus Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.341 8	0.365 5	0.397 1	0.450 3	0.509 8	0.572 9	0.659 6	0.569 3	0.4129
	Model Forcing - Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0.345 2	0.359 8	0.408	0.473 2	0.535 6	0.594 3	0.559 4	0.305 9	0.06019
-2		0.341 5	0.359 9	0.389 1	0.450 7	0.516 3	0.621 6	0.630 8	0.410 2	0.1453
-4		0.332 8	0.363 4	0.385 9	0.447 4	0.520 2	0.628	0.663 9	0.511 4	0.2968
-6		0.324 3	0.348 5	0.389 8	0.454 6	0.503 2	0.582	0.657 5	0.563 8	0.3288
-8		0.342 1	0.351 4	0.391 2	0.450 3	0.511 9	0.57	0.658 9	0.563 8	0.362
Picea Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.574 8	0.572 8	0.578 7	0.572	0.576 3	0.569 1	0.564 6	0.539 1	0.5151
	Model Forcing - Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0.608 9	0.607 9	0.613 5	0.629 9	0.621 6	0.619 3	0.606 9	0.572 5	0.503
-2		0.592 3	0.595 1	0.594 8	0.604 1	0.602 9	0.607 6	0.604 6	0.591 9	0.5419
-4		0.585 4	0.600 1	0.578 2	0.579 3	0.582 4	0.577 4	0.578 7	0.554 6	0.5606
-6		0.582	0.585 6	0.579 5	0.586 1	0.576 6	0.568 6	0.563 1	0.55	0.5141
-8		0.573 7	0.569 9	0.578 9	0.579 5	0.577 6	0.573 5	0.569 3	0.534 2	0.4967
Fagus Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8

	Model Forcing	0.526 2	0.525 2	0.519 1	0.523 6	0.514	0.512	0.491 4	0.467 5	0.4349
Tcbase (°C)	Model Forcing - Chilling									
0		0.543 9	0.543 5	0.549 2	0.520 5	0.500 2	0.472 1	0.456 8	0.451 2	0.3987
-2		0.528 7	0.537 8	0.542 9	0.517	0.497 1	0.480 1	0.463 8	0.410 2	0.3927
-4		0.530 5	0.533 5	0.522 7	0.527 3	0.513 6	0.490 6	0.472 7	0.438 7	0.401
-6		0.529 8	0.531 2	0.526 7	0.526 8	0.521 5	0.506 9	0.484	0.463 4	0.4291
-8		0.528 2	0.53	0.529 2	0.517 4	0.519	0.500 8	0.488	0.468 6	0.4385

Start Day 60 DOY

Picea Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.334	0.3589	0.4234	0.4697	0.5086	0.5119	0.4057	0.2752	0.1313
Tcbase (°C)	Model Forcing- Chilling									
0		0.3257	0.3608	0.4017	0.4714	0.4812	0.4566	0.3921	0.2685	0.207
-2		0.335	0.3604	0.4205	0.4773	0.4909	0.4788	0.3978	0.2567	0.1708
-4		0.3465	0.3622	0.3988	0.4668	0.5009	0.4931	0.4132	0.299	0.1492
-6		0.3285	0.3605	0.4176	0.4747	0.5115	0.5034	0.3947	0.2818	0.1521
-8		0.3293	0.3667	0.4219	0.4795	0.5136	0.5009	0.3921	0.2879	0.1299
Fagus Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.4093	0.4443	0.4847	0.5538	0.5852	0.6603	0.6571	0.5801	0.4129
Tcbase (°C)	Model Forcing- Chilling									

0		0.418	0.4502	0.5004	0.579	0.6421	0.652	0.5119	0.2595	0.06924
-2		0.4158	0.4356	0.4866	0.536	0.6102	0.6559	0.6359	0.4018	0.1331
-4		0.4044	0.4411	0.4753	0.5439	0.5864	0.6541	0.6644	0.5072	0.2968
-6		0.4045	0.4367	0.5012	0.5417	0.5812	0.6561	0.6474	0.5666	0.3288
-8		0.4094	0.4413	0.4775	0.5447	0.5823	0.67	0.6598	0.5779	0.362
Picea Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.5947	0.5855	0.5967	0.5917	0.5839	0.5651	0.5553	0.5448	0.5165
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0.6032	0.6262	0.6329	0.6332	0.6186	0.6161	0.5867	0.5371	0.4712
-2		0.6142	0.6152	0.6266	0.6288	0.6287	0.6091	0.5907	0.5578	0.5086
-4		0.5897	0.6099	0.604	0.5941	0.6116	0.5984	0.5932	0.5645	0.5383
-6		0.6028	0.6	0.6019	0.5991	0.5866	0.585	0.5691	0.5654	0.5224
-8		0.599	0.5924	0.5858	0.5978	0.5829	0.5714	0.5638	0.5422	0.5233
Fagus Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.5313	0.5322	0.5139	0.5088	0.4959	0.4933	0.4774	0.4631	0.436
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0.5351	0.5322	0.5346	0.5082	0.4876	0.4729	0.4382	0.4299	0.3499
-2		0.5404	0.5263	0.5302	0.5187	0.5003	0.4986	0.4726	0.4305	0.3788
-4		0.541	0.54	0.5392	0.5199	0.5051	0.5025	0.4632	0.444	0.4013
-6		0.5475	0.5196	0.5236	0.5133	0.5041	0.4951	0.4696	0.4487	0.4183
-8		0.5308	0.5314	0.5205	0.5179	0.5093	0.4831	0.4677	0.4638	0.4425

Start Day 75 DOY

Picea Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.4271	0.4448	0.4911	0.5354	0.5536	0.5157	0.3943	0.2677	0.1313
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0.4125	0.4456	0.4946	0.5135	0.5326	0.4647	0.3893	0.2661	0.1855
-2		0.4202	0.4547	0.4847	0.5225	0.5457	0.5126	0.3953	0.2602	0.1568
-4		0.4224	0.4398	0.4862	0.5403	0.5599	0.5164	0.4194	0.2932	0.1492
-6		0.4311	0.4469	0.4808	0.5244	0.5465	0.5272	0.3855	0.2818	0.1521
-8		0.4278	0.4448	0.4915	0.5245	0.5418	0.5194	0.396	0.2847	0.1299
Fagus Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.655	0.6594	0.6705	0.7099	0.6936	0.7046	0.6833	0.5813	0.4119
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0.6494	0.656	0.6699	0.7015	0.6939	0.6866	0.5248	0.2578	0.08473
-2		0.6477	0.6612	0.6821	0.6996	0.695	0.7033	0.6486	0.4061	0.1373
-4		0.638	0.6596	0.6717	0.7183	0.6917	0.7033	0.6844	0.51	0.2963
-6		0.6313	0.6552	0.69	0.7086	0.7044	0.7071	0.6864	0.5709	0.3281
-8		0.649	0.657	0.6802	0.7179	0.7022	0.7003	0.679	0.5814	0.362
Picea Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.3462	0.3346	0.3268	0.3269	0.3272	0.3251	0.3244	0.3258	0.32
	Model Forcing- Chilling									
Tcbase (°C)										
0		0.3708	0.3721	0.3833	0.3648	0.3752	0.3918	0.4091	0.381	0.3704
-2		0.3451	0.3668	0.3469	0.3429	0.3415	0.3439	0.35	0.3515	0.3709
-4		0.344	0.3283	0.322	0.3256	0.3477	0.3409	0.3449	0.3537	0.3524

-6		0.3467	0.3607	0.3413	0.3359	0.3241	0.3258	0.3339	0.3261	0.3223
-8		0.3405	0.3362	0.3355	0.3298	0.3285	0.32	0.3151	0.3258	0.3315
Fagus Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.4076	0.3878	0.4038	0.3985	0.3909	0.3988	0.3751	0.3606	0.3361
	Model Forcing- Chilling									
0		0.4009	0.394	0.373	0.3711	0.3472	0.3161	0.2798	0.2298	0.2021
-2		0.4068	0.3763	0.3703	0.367	0.3499	0.352	0.3306	0.3269	0.2741
-4		0.3968	0.4063	0.3775	0.3824	0.366	0.3744	0.3599	0.3446	0.3456
-6		0.3914	0.4107	0.3963	0.3954	0.3819	0.3771	0.3796	0.3733	0.3548
-8		0.4225	0.3821	0.4005	0.3907	0.3855	0.3962	0.366	0.3572	0.33

Start Day 90 DOY

Picea Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.4502	0.4564	0.5148	0.5379	0.5615	0.5431	0.3923	0.2694	0.1314
	Model Forcing- Chilling									
0		0.4319	0.437	0.4732	0.5125	0.5177	0.484	0.3988	0.2752	0.1783
-2		0.4386	0.446	0.5068	0.515	0.5237	0.5072	0.4065	0.255	0.1585
-4		0.4041	0.4668	0.4873	0.5285	0.5435	0.5186	0.4039	0.2923	0.1529
-6		0.4307	0.4427	0.5034	0.5362	0.5493	0.5151	0.4017	0.2778	0.1511
-8		0.4397	0.4466	0.515	0.5325	0.5528	0.5471	0.386	0.2818	0.1264
Fagus Norsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.7671	0.7726	0.8079	0.8053	0.7935	0.7551	0.6956	0.5726	0.4128
	Model Forcing- Chilling									

0		0.7708	0.7703	0.7691	0.7684	0.7442	0.6851	0.5028	0.2469	0.08439
-2		0.7803	0.784	0.7921	0.7957	0.7622	0.7216	0.653	0.4033	0.136
-4		0.796	0.7769	0.793	0.8009	0.7788	0.7497	0.6848	0.5378	0.2953
-6		0.7644	0.7729	0.8014	0.8094	0.8002	0.7501	0.6952	0.5783	0.3551
-8		0.7644	0.7779	0.8014	0.8066	0.8022	0.7488	0.6993	0.573	0.3628
Picea Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0.2302	0.2489	0.2354	0.2488	0.2327	0.2243	0.2206	0.199	0.2047
	Model Forcing- Tcbase (°C) Chilling									
0		0.2319	0.2277	0.2323	0.2222	0.2332	0.2285	0.2454	0.2537	0.2516
-2		0.2023	0.2173	0.2599	0.2542	0.2366	0.2305	0.2267	0.2124	0.1928
-4		0.2438	0.2493	0.2351	0.2523	0.2329	0.2357	0.2389	0.2241	0.2202
-6		0.222	0.2041	0.2256	0.233	0.2417	0.2317	0.2147	0.2239	0.1898
-8		0.2161	0.2327	0.2276	0.2223	0.2174	0.2463	0.2301	0.213	0.2014
Fagus Chorvatsko	Tbase (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Model Forcing	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Model Forcing- Tcbase (°C) Chilling									
0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2		0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4		0	0	0	0	0	0	0	0	0
-6		0	0	0	0	0	0	0	0	0
-8		0	0	0	0	0	0	0	0	0

9.2. R Skripty Forcing a Forcing-Chilling

Příklad skriptu pro Forcing predikující rašení smrku (Picea) v Chorvatsku

```
library (dplyr)
library (lubridate)

#chr3 ... soubor s klimatickymi daty#
#chr3c ... soubor s fenologickymi daty#

#nastaveni parametru#
thresh<- 2 (Tbase)
startday<- 60 (Start Day pro Forcing)

#prevedeni data a spocitani sumovane teploty dd5#
chr3$year <- substr (chr3$Date, 1,4)
chr3$day <- substr (chr3$Date, 5,8)
chr3$day <- substr (chr3$Date, 7,8)
chr3$month <- substr (chr3$Date, 5,6)
chr3$dd5<- ifelse (chr3$Temp>thresh, chr3$Temp - thresh, 0)
chr3$newdate2<-seq.Date(from = as.Date(0, origin = "1961-01-01"),to = as.Date(0,
origin = "2015-12-31"), by = "day")
chr3$Start Day <- yday(chr3$newdate2)
chr4<- subset (chr3, Start Day>=startday)

#vytvoreni souboru pro ukladani vysledku#
res1<- data.frame (year = seq (1961,2015, by = 1), Forcing = NA, Start Dayforc = NA,
Start Dayobser = chr3c$Start DayPicea)
```

#součet Forcing teploty #

```
for (i in c(1:nrow(chr3c))) {  
  if (is.na (chr3c$Start DayPicea [i])) {next}  
  chr5<- subset (chr4, year == chr3c$year [i])  
  chr5$cum<- cumsum(chr5$dd5)  
  chr5a<- subset (chr5, Start Day>0 & Start Day<= chr3c$Start DayPicea [i])  
  resdd5a<- chr5a %>% group_by(year) %>% summarise(dd5 = sum(dd5))  
  
  res1[i, "Forcing"]<- resdd5a$dd5  
  
  rm(chr5,chr5a,resdd5a)  
}
```

```
res2<- subset(res1, Forcing>0)  
meanforc<- mean (res2$Forcing)
```

```
for (i in c(1:nrow(chr3c))) {  
  if (is.na (chr3c$Start DayPicea [i])) {next}  
  chr5<- subset (chr4, year == chr3c$year [i])  
  chr5$cum<- cumsum(chr5$dd5)  
  Start Dayf<- chr5[which.min(abs(meanforc-chr5$cum)),]  
  
  res1[i, "Start Dayforc"]<- Start Dayf$Start Day  
  
  rm(chr5, Start Dayf)  
}
```

#vykreslení grafu #

```
plot(Start Dayforc~Start Dayobser, data = res1, xlim = c(50, 180), ylim = c(50,180),  
xlab="Pozorování (Start Day)", ylab="Model (Start Day)")
```

Příklad skriptu pro Forcing-Chilling predikující rašení smrku (Picea) v Norsku

```
library (dplyr)
library (lubridate)

#tt3 ... soubor s klimatickymi daty#
#tt3c ... soubor s fenologickymi daty#

#nastaveni parametru#
thresh<- 4 (Tbase)
startday<- 75 (Start Day pro Forcing)
threshC<- -4 (Tcbase)
startchill<- 180 (Start Day pro Chilling, konstantní hodnota)

#prevedeni data a spocitani sumovane teploty dd5#
tt3$year <- substr (tt3$Date, 1,4)
tt3$day <- substr (tt3$Date, 5,8)
tt3$day <- substr (tt3$Date, 7,8)
tt3$month <- substr (tt3$Date, 5,6)
tt3$dd5<- ifelse (tt3$Temp>thresh, tt3$Temp - thresh, 0)
tt3$chill<- ifelse (tt3$Temp<threshC, 1, 0)
tt3$newdate2<-seq.Date(from = as.Date(0, origin = "1964-01-01"),to = as.Date(0,
origin = "2005-12-31"), by = "day")
tt3$Start Day <- yday(tt3$newdate2)
tt3$year1<- as.numeric(tt3$year)
tt3$chillyear <- ifelse (tt3$Start Day> startchill,tt3$year1+1, tt3$year1)
tt4<- subset (tt3, Start Day>=startday)
```

```
ttch <- subset (tt3, startchill>270 | Start Day<=startday)
```

#vytvoreni souboru pro ukladani vysledku Forcing#

```
res1<- data.frame (year = seq (1964,2005, by = 1), Forcing = NA, Start Dayforc = NA,  
Start Dayobser = tt3c$Start DayPicea)
```

#vytvoreni souboru pro ukladani vysledku Chilling#

```
resCH<- data.frame (year = seq (1964,2005, by = 1), chillyear = NA, Chilling = NA)
```

#Forcing cyklus#

```
for (i in c(1:nrow(tt3c))) {  
  if (is.na (tt3c$Start DayPicea [i])) {next}  
  tt5<- subset (tt4, year == tt3c$year [i])  
  tt5$cum<- cumsum(tt5$dd5)  
  tt5a<- subset (tt5, Start Day>0 & Start Day<= tt3c$Start DayPicea [i])  
  resdd5a<- tt5a %>% group_by(year) %>% summarise(dd5 = sum(dd5))  
  
  res1[i, "Forcing"]<- resdd5a$dd5  
  
  rm(tt5,tt5a,resdd5a)  
}
```

#Chilling cyklus#

```
for (i in c(1:nrow(tt3c))) {  
  if (is.na (tt3c$Start DayPicea [i])) {next}  
  tt6<- subset (ttch, chillyear == tt3c$year [i])  
  reschill<- tt6 %>% group_by(chillyear) %>% summarise(chill = sum(chill))  
  resCH[i, "Chilling"]<- reschill$chill  
  resCH[i, "chillyear"]<- reschill$chillyear  
  rm(tt6,reschill)  
}
```

```
#součet Forcing teploty a Chilling dní #
```

```
res0<- merge (res1, resCH, by = "year")  
res0$budunits<- res0$Forcing + res0$Chilling  
res02<- subset(res0, Chilling>=0)  
meanpredbud<- mean (res02$budunits)
```

```
for (i in c(1:nrow(tt3c))) {  
  if (is.na (tt3c$Start DayPicea [i])) {next}  
  tt5<- subset (tt4, year == tt3c$year [i])  
  tt5$cum<- cumsum(tt5$dd5)  
  Start Dayf<- tt5[which.min(abs(meanpredbud-tt5$cum)),]  
  
  res1[i, "Start Dayforc"]<- Start Dayf$Start Day  
  
  rm(tt5, Start Dayf)  
}
```

```
#vykreslení grafu #
```

```
plot (Start Dayforc~Start Dayobser, data = res1, xlim = c(50, 180), ylim = c(50,180),  
xlab="Pozorování (Start Day)", ylab="Model (Start Day)")
```