

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD



Česká
zemědělská
univerzita
v Praze

Posouzení vlivu klimatických změn na geografické rozšíření
ptačích druhů

Assessment of the impact of climate change on the
geographical distribution of bird species

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Jáchym Křížek

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Gábor Ph.D.

2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jáchym Křížek

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Posouzení vlivu klimatických změn na geografické rozšíření ptačích druhů

Název anglicky

Assessment of the impact of climate change on the geographical distribution of bird species

Cíle práce

Cílem práce je, s využitím modelů druhové distribuce, posoudit vliv klimatických změn na geografické rozšíření vybraných ptačích druhů žijících na území České republiky.

Formulace dílčích cílů je úkolem autora.

Metodika

Studium vztahů mezi prostředím a druhy, které v něm žijí, patří k jednomu z hlavních úkolů ekologie. K tomuto účelu se dnes využívají modely druhové distribuce, často používané například v biogeografii, makroekologii či ochraně přírody. Ty se dají aplikovat při určení lokalit potenciálně ohrožených invazními druhy, pro vymezení chráněných území nebo pro vytipování neprozkoumaných lokalit s potenciálním výskytem vzácných druhů. V posledních letech se také staly důležitým nástrojem pro studium vlivu klimatických změn na geografické rozšíření druhů. Klima hraje při rozšíření druhů primární roli. Proto lze očekávat, že se v následujících letech vlivem klimatických změn zásadně promění druhová distribuce, tak jak ji známe dnes.

Úkolem autora je zpracovat literární rešerši na (i) téma klimatických změn a jejich vlivu na biodiverzitu a (ii) na téma druhových distribučních modelů. V praktické části pak modelovat současné a budoucí rozšíření pro vybrané ptačí druhy a prozkoumat jakým způsobem se promění jejich distribuce na území České republiky.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora

Doporučené zdroje informací

- Araújo, M. B., & Rahbek, C. (2006). How does climate change affect biodiversity?. *Science*, 313(5792), 1396-1397.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, 15(4), 365-377.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.
- Miller J., *Species Distribution Modelling*. *Geography Compass*. 2010, 4(6), 490-509
- Santini, L., Benítez-López, A., Maiorano, L., Čengić, M., & Huijbregts, M. A. (2021). Assessing the reliability of species distribution projections in climate change research. *Diversity and Distributions*, 27(6), 1035-1050.
- Willis, K. J., & Bhagwat, S. A. (2009). Biodiversity and climate change. *Science*, 326(5954), 806-807.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Gábor, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 16. 2. 2023

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 2. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Posouzení vlivu klimatických změn na geografické rozšíření ptačích druhů vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Poděbradech dne 30.3.2023

.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Lukáši Gáborovi Ph.D. za odborné vedení, dobré rady a velkou míru trpělivosti. Dále děkuji Ing. Petru Balejovi za poskytnutí výskytových dat, upravených pomocí nástroje NDOP Downloader.

Abstrakt

V současné době je na výzkum vlivu klimatických změn na biodiverzitu upřeno mnoho pozornosti. Modely druhové distribuce (SDM) jsou, z několika objektivních důvodů, dalece nejlepší nástroj pro popisování a predikce změn druhové distribuce jednotlivých druhů. Pomocí SDM lze popsat vhodné současné i budoucí podmínky pro výskyt druhů. V první části práce byla formou literární rešerše shrnuta problematika klimatické změny, dopadů klimatické změny na biodiverzitu a obecného fungování SDM. V druhé části práce byly tyto znalosti využity pro tvorbu SDM vybraných ptačích druhů, s cílem kvantifikovat změnu druhové distribuce těchto druhů v České republice. K tvorbě modelů byla využita modelovací metoda Maxent. Pomocí výsledků vytvořených modelů bylo možné kvantifikovat změnu v geografické distribuci těchto druhů. Všechny modelované druhy reagují na změnu klimatu změnou geografické distribuce. Nárůst, nebo pokles vhodných habitatů na území ČR pak závisí na současném geografickém výskytu konkrétních druhů. Nárůst habitatů vybraných druhů se pohybuje v rozmezí 8.75 až 2 362.52 %. Habitaty, které se v současné době rozkládají v nejteplejších částech ČR se rozrůstají nejvíce. Habitaty v klimaticky chladnějších oblastech naopak vykazují úbytek. Ten se v případě našich vybraných druhů pohybuje mezi 0 až 93,36 % současných habitatů.

Klíčová slova: modely druhové distribuce, dopady klimatické změny, prostorová distribuce druhů, trendy migrace

Abstract

Currently, there is significant focus on studying the impact of climate change on biodiversity. Species distribution models (SDMs) are widely regarded as the best tool for predicting and describing changes in species distribution due to climate change. SDMs provide valuable information on suitable conditions for species occurrence, both currently and in the future. The first part of this thesis provides a literature review summarizing the issues related to climate change, its impact on biodiversity, and the general functioning of SDMs. In the second part of the thesis, this knowledge is applied to develop SDMs for selected bird species in the Czech Republic. The main objective is to quantify changes in the distribution of these species due to climate change. The Maxent modelling method is used to create the SDMs. The results of the SDMs indicate that all of the modelled species respond to climate change by changing their geographical distribution. The extent of change, whether an increase or decrease in suitable habitats in the Czech Republic, depends on the current geographical distribution of specific species. The increase in habitats of the selected species ranges from 8.75 to 2 362.52 %. Habitats that are currently located in the warmest parts of the country are increasing the most. Habitats in climatically cooler areas, on the other hand, are showing a decline. This ranges from 0 to 93.36 % of the current habitats for our selected species.

Key words: species distribution models, impacts of climate change, spatial distribution of species, migration trends

Obsah

1	Úvod	1
2	Literární rešerše	2
2.1	Klimatická změna	2
2.2	Dopady změny klimatu na biodiverzitu	4
2.3	SDM	5
3	Metodika	13
3.1	Použitý software	13
3.2	Popis zájmového území	13
3.3	Výskytová data	13
3.4	Klimatická data	14
3.5	Příprava modelu	15
3.6	Evaluaace modelu	15
4	Výsledky	17
4.1	Volavka vlasatá (<i>Ardeola ralloides</i>)	17
4.2	Jespák písečný (<i>Calidris alba</i>)	17
4.3	Ústříčnick velký (<i>Haematopus ostralegus</i>)	18
4.4	Rybák bělokřídlý (<i>Chlidonias leucopterus</i>)	18
4.5	Budníček zelený (<i>Phylloscopus trochiloides</i>)	18
5	Diskuze	25
6	Závěr a přínos práce	27
7	Přehled literatury a použitých zdrojů	28
8	Seznam použitých zkratk	33
9	Seznam tabulek	34
10	Seznam obrázků	34
11	Přílohy	35

1 Úvod

V současné době čelíme bezprecedentní klimatické změně. Klimatické změny jsou pozorovány v doposud známé historii Země, avšak žádná ze zaznamenaných změn nebyla doposud takto intenzivní (Fawzy et al. 2020). Takto intenzivní klimatické změny mají výrazný vliv na ekosystémy po celé planetě (Trew, MacLean 2021, Meyer et al. 2022). Většinou se projevují destruktivně, například snížením druhové distribuce (Sabater et al. 2023), nebo zapříčiní změnu distribuce druhu (Hill et al. 2011) a tím pomáhají k zániku ekosystému. Tyto dopady je zapotřebí kvantifikovat, aby bylo možné komplexně a efektivně reagovat na konkrétní hrozby a problémy. Ideálním nástrojem pro popis vlivu klimatu na ekosystémy jsou Modely druhové distribuce (z anglického Species distribution models, zkráceně SDM), v posledních dekádách často používané (Gogol-Prokurat 2011, Wiese et al 2019, Li Z. et al. 2022).

Modely druhové distribuce jsou nástroje používané v ekologii, biogeografii a příbuzných vědních oborech pro určení ekologické niky druhu, pravděpodobnosti výskytu a zjištění celkového rozšíření druhu ze zaznamenaných pozorování (Miller 2010). V současné době jsou modely druhové distribuce čím dál častěji používány k popisování vlivu klimatu na druhovou distribuci (Santini et al. 2021). Tyto modely stojí na sofistikovaných statistických metodách schopných predikovat druhovou distribuci za současných, minulých i budoucích klimatických podmínek (Miller et al. 2014). Pro predikce druhové distribuce je nejčastěji používána metoda Maxent (Elith et al. 2011) Maxent je metoda s malými nároky na vstupní data, dosahuje velmi dobrých výsledků a je uživatelsky přívětivá (Merow et al. 2013).

Cílem bakalářské práce je, za pomoci dostupných výskytových a klimatických dat, vytvořit modely druhové distribuce pro vybrané ptačí druhy s jejichž pomocí lze kvantifikovat, jak mohou klimatické změny ovlivnit prostorovou distribuci těchto druhů. Pro tento účel byla použita výskytová data vygenerována z Nálezové databáze ochrany přírody AOPK ČR a environmentálních proměnných obsahují 2 datasey – dataset současných a budoucích klimatických podmínek.

2 Literární rešerše

2.1 Klimatická změna

Klimatická změna je chápána jako průběh klimatu v určitém časovém měřítku, kdy se trend variability projevuje výrazně jednostranně (dlouhodobý nárůst nebo pokles teploty). Klimatickou změnu můžeme chápat a popisovat v měřítku země jako celku, nebo pouze určitého regionu (IPCC, 2023). Příčinou klimatické změny je změna jednoho, nebo více faktorů, ovlivňujících celkový charakter klimatu. Tyto faktory se mohou dělit na antropogenní a přirozené (De Matteis 2019). Mezi přirozené faktory jsou zahrnuty pohyby hmot zemského povrchu, vulkanismus a interakce s ostatními vesmírnými tělesy. (Mörner 2015). Antropogenní faktory zahrnují zvýšenou genezi skleníkových plynů, genezi agresivních NO_x (různé formy oxidů dusíku), znečištění přízemním ozonem, znečištění prašnými částicemi, změnu využívání půdy a odlesňování (De Matteis 2019).

Porovnání vlivu těchto faktorů na celkový průběh klimatické změny si klade za cíl vícero výzkumů (např. Crowley 2000, Miller et al. 2014, De Matteis 2019). Všechny tyto výzkumy analyzují pomocí modelů z nasbíraných klimatických dat průběh klimatické změny v čase a následně vyhodnocují vlivy jednotlivých faktorů na její celkový průběh. Závěry naznačují, že se na současné klimatické změně podílí antropogenní a přirozené faktory přibližně stejnou měrou (De Matteis 2019, Mörner 2015). Překvapivě nebyl prokázán vliv černého uhlíku (součást drobných prachových částic, vzniká nedokonalým spalováním) na změnu klimatu a efekt aerosolů síry je výrazně menší, než bylo odhadováno (De Matteis 2019). Miller et al. (2014) a Crowley (2000) shodně pozorují ve svých modelech výrazné oteplení během druhé poloviny dvacátého století. V obou případech měl na model výrazný vliv nárůst produkce skleníkových plynů (Miller et al. 2014, Crowley 2000).

V historii nalézáme několik period, během kterých proběhly dramatické změny klimatu. Výraznou změnou klimatu si Země prošla během tzv. malé doby ledové, která navazovala na přelomu 15. a 16. století na tzv. středověké klimatické optimum a trvala až do 19. století. Během této periody byl zaznamenán pokles průměrné teploty o 0.6°C (Mann et al. 1999). V současné době však čelíme bezprecedentní klimatické změně, kdy se průměrná teplota zvýšila v průběhu 200 let téměř o 1 stupeň. Výrazně se zvyšuje množství akumulovaného tepla, které následně urychluje další změny. (např. NOAA 2022; <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>)

V současné době je klimatická změna silně medializované a popularizované téma díky vlivu sociálních médií. Široce vedená diskuse pak dává možnost laické veřejnosti podílet se na ovlivňování přístupu ke klimatické změně (Mavrodieva et al. 2019). Díky tlaku veřejnosti a snaze o udržitelnost odpovídají vlády programy na sledování klimatu a opatřeními podporujícími udržitelnost (Dietz et al. 2020). Příkladem může být uveden program Ministerstva životního prostředí: Národní program na zmírnění dopadů klimatické změny. Kromě vládních programů vstupují do této problematiky mezinárodní společnosti, a to nejčastěji tvorbou tematicky zaměřených institucí. Mezi nejdůležitější instituce tohoto typu patří The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2023; <https://www.ipcc.ch>). Organizace vznikla v roce 1988 a jejím hlavním zaměřením je hodnocení klimatické změny a jejich sociálních a environmentálních důsledků. Z těchto údajů pak IPCC pravidelně připravuje zprávy, kde jsou dostupné nejnovější informace o vědeckých, sociálních a technických aspektech. Tyto dokumenty jsou veřejně dostupné (<https://www.ipcc.ch>).

Z popisu a hodnocení průběhu klimatické změny mohou být vyvozena rizika, které klimatická změna přináší. World Economic Forum (WEF) se, mimo jiné, zabývá vyhodnocováním globálních rizik na základě zpráv IPCC a dalších dostupných podkladů. Ve zprávě WEF jsou vyhodnocena veškerá globální rizika dle pravděpodobnosti vzniku a jejich závažnosti. V hodnocení rizik v krátkodobém měřítku (2 roky) se umístilo v první desítce pět environmentálních rizik (číslo v závorce za hrozbou značí pořadí v hodnocení). Jsou to Přírodní katastrofy a extrémní počasí (2.), selhání zpomalení klimatické změny (4.), velkokapacitní environmentální poškození (6.), selhání adaptace na klimatickou změnu (7.) a nedostatek přírodních zdrojů (10.). V dlouhodobém měřítku (10 let) se nachází v první desítce dle závažnosti dopadů šest environmentálních rizik, ze kterých se čtyři nachází na prvních čtyřech místech: selhání zpomalení klimatické změny (1.), selhání adaptace na klimatickou změnu (2.), přírodní katastrofy a extrémní počasí (3.), ztráta biodiverzity a kolaps ekosystémů (4.), nedostatek přírodních zdrojů (6.), velkokapacitní environmentální poškození (6.). (World Economic Forum 2023; <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/>).

Rychlost klimatické změny se v posledních dekadách zvyšuje, od preindustriální éry do současnosti se průměrná teplota zvýšila o 1°C (Fawzy et al. 2020). Páteřním dokumentem je v současnosti Pařížská dohoda, která si stanovuje za cíl pokusit se zpomalit globální nárůst teploty pod 1,5°C. Tohoto cíle má být dosaženo tvorbou a plněním Národních redukčních příspěvků (NDC), určením základních zásad mitigačních a adaptačních opatření a jejich financování (Pařížská dohoda 2016).

2.2 Dopady změny klimatu na biodiverzitu

Dopady klimatické změny můžeme rozložit do 3 oblastí – environmentální, lidské a ekonomické. Pro všechny tyto oblasti se jeví většina dopadů klimatických změn jako negativní. Je těžké rozlišit mezi jednotlivými faktory a procesy, zdali se jedná spíše o příčiny klimatických změn, nebo již jejich důsledky (Stejskal 2012). Hodnotící zprávy IPCC dokazují, s vysokou mírou pravděpodobnosti, existenci vlivu regionálních teplotních změn na biodiverzitu (IPCC 2023).

Biodiverzitu můžeme definovat jako celkové množství živočišných a rostlinných druhů v ekosystému. Na základě této myšlenky jsme schopni určovat její hodnotu a v čase pozorovat její změny (Purvis, Hector 2000). Tvorba a udržitelnost biodiverzity závisí na interakci jednotlivých druhů s prostředím i s dalšími druhy. Pro zachování biodiverzity je důležitá stálost a dostatečná možnost interakce s dalšími biotopy (Buczynski et al. 2011). I druhové složení biotopu je důležité. Na existenci některých druhů jsou navázány ostatní druhy, někdy i funkčnost celého biotopu (Redford, Richter 1999). Na výzkum dopadu klimatické změny na biodiverzitu se v posledním desetiletí zaměřuje mnoho pozornosti (García et al. 2018, Trew, MacLean 2021, Meyer et al. 2022, Moustakis et al. 2022, Sabater et al. 2023).

Nejvýraznějším faktorem klimatické změny s dopadem na biodiverzitu je zvyšující se teplota (Stejskal 2012, IPCC 2023). Zvýšení průměrné teploty má větší dopad na ekosystémy s dlouhodobě stálým klimatem, kde je menší šance výskytu druhů dobře snášejících tyto změny (Trew, MacLean 2021). To způsobuje paradoxní situaci, kdy oslabené ekosystémy hůře odolávají dalším disturbancím a zároveň pro tyto disturbance vytvářejí stále vhodnější podmínky (García et al. 2018). Kromě zvýšení průměrné teploty jsou také důležité změny maximální a minimální teploty, které mohou mít závažné dopady na ekosystém (Meyer et al. 2022).

Ovlivnění ustálených proudění vzduchu v atmosféře a vody v oceánech nárůstem teplot zasahuje do distribuce srážek, jak v jejich celkovém úhrnu, tak v jejich prostorové distribuci (Haque et al. 2016). Tento efekt však není rovnoměrný, zatímco ve středních zeměpisných šířkách srážkový úhrn stoupá, v subtropích a na severní polokouli se celkový srážkový úhrn snižuje (Stejskal 2012). Dalším dopadem vyvolaným bezprecedentně rychlým oteplováním jsou extrémní klimatické jevy (Stott 2016). Extrémní množství vody, nebo její dočasný nedostatek mají dopad na vodní i pevninské ekosystémy. Gao et al. (2020) popisuje ve své práci dopady nepravidelných přebytků a nedostatků vody na lesní systémy na severozápadě

USA. Studie dochází k závěru, že lesní systémy jsou schopny poměrně dobré adaptace na dlouhodobé podmínky, ať suché, nebo vlhké. Avšak je citlivá na krátkodobé výkyvy (Gao et al. 2020). Bond et al. (2008) zkoumá dopady nedostatku vody na Australské sladkovodní systémy. Tyto okolnosti mají vliv na zhoršení kvality sladkovodních ekosystémů, které jsou ještě umocněny nevhodnou antropogenní činností (Bond et al. 2008). Výsledky Dopady však nejsou závislé jen na množství vody, ale také na její teplotě. Sabater et al. (2023) nalézá ve svém výzkumu mnoho událostí, kdy extrémní vlivy počasí zapříčiňují změnou teploty vody a jejího proudění snížení druhové rozmanitosti v říčních ekosystémech (Sabater et al. 2023). U pevninských ekosystémů nezáleží jen na celkovém úhrnu spadlých srážek, ale také na jejich distribuci v čase. I přes celkově stejný úhrn srážek může dojít k ohrožení ekosystému, kdy v nejsušších nebo naopak v nejvlhčích měsících jsou silně ohroženy druhy s nízkou tolerancí k těmto změnám (Moustakis et al. 2022).

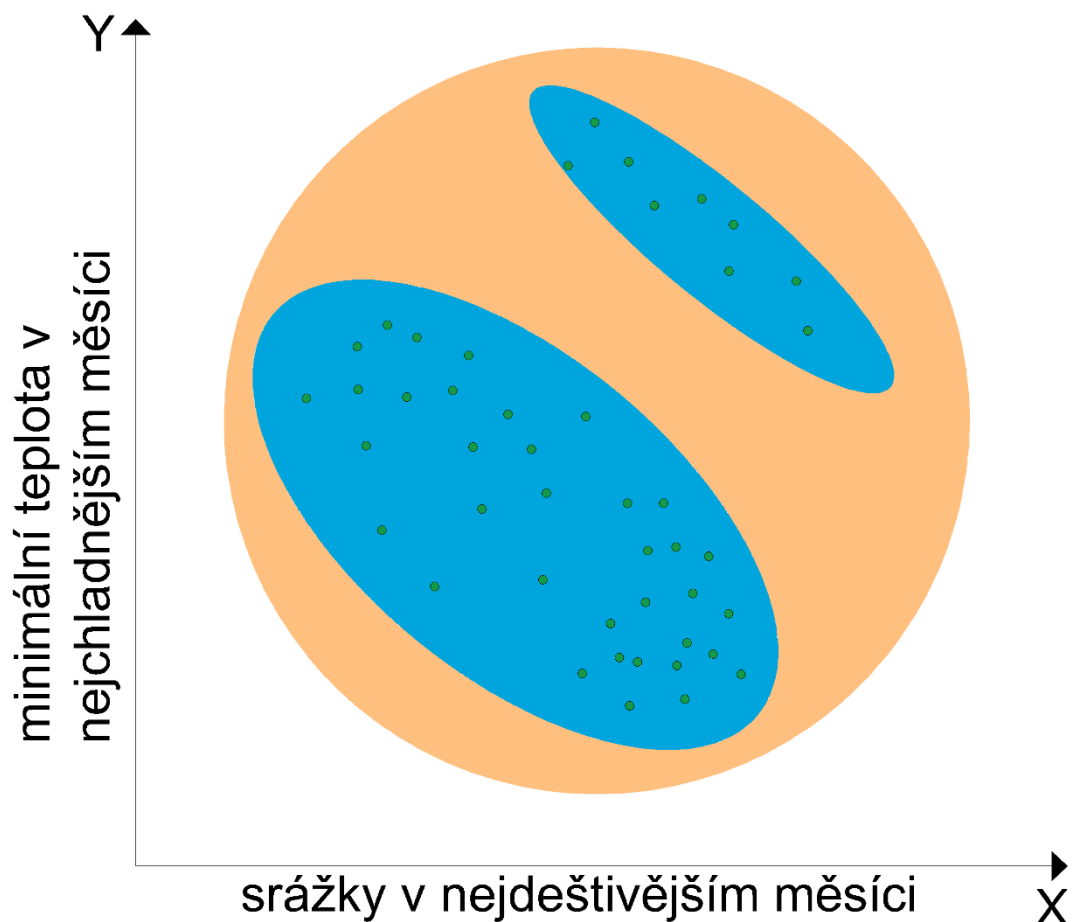
Pro pochopení vlivu klimatické změny na biodiverzitu je zapotřebí pochopit a popsat reakce jednotlivých druhů na změny v prostředí. Každý jednotlivý druh reaguje rozdílně na změny environmentálních proměnných v ekosystému. Reagovat mohou druhy adaptací na nové prostředí, nebo častěji přesunem své distribuce do vhodných podmínek (Hill et al. 2011, Hoffman, Sgrò 2011). Zdaleka nejvíce rozšířeným nástrojem k popisu těchto změn jsou v současné době modely druhové distribuce (Araújo, Rahbek 2006, Bellard et al. 2012, Gao et al. 2020).

2.3 SDM

Modely druhové distribuce (z anglického originálu Species distribution models, dále jen SDM) jsou v současné době páteřním prvkem ke kvantifikaci vztahu mezi druhem a environmentálním prostředím, používaného k predikci druhové distribuce a popisu jednotlivých faktorů, které na druh působí v místě jeho výskytu. Jako vstupní data k využívají tyto modely záznamy o výskytu druhu a environmentální proměnné v místě pozorování. SDM se, kromě studia vlivu klimatických změn (Bellard et al. 2012), používají také ke zjištění celkového rozšíření druhů, zjištění pravděpodobnosti výskytu druhů v současnosti, minulosti, nebo budoucnosti či k modelování ekologické niky druhu (Aguirre-Gutiérrez et al. 2013).

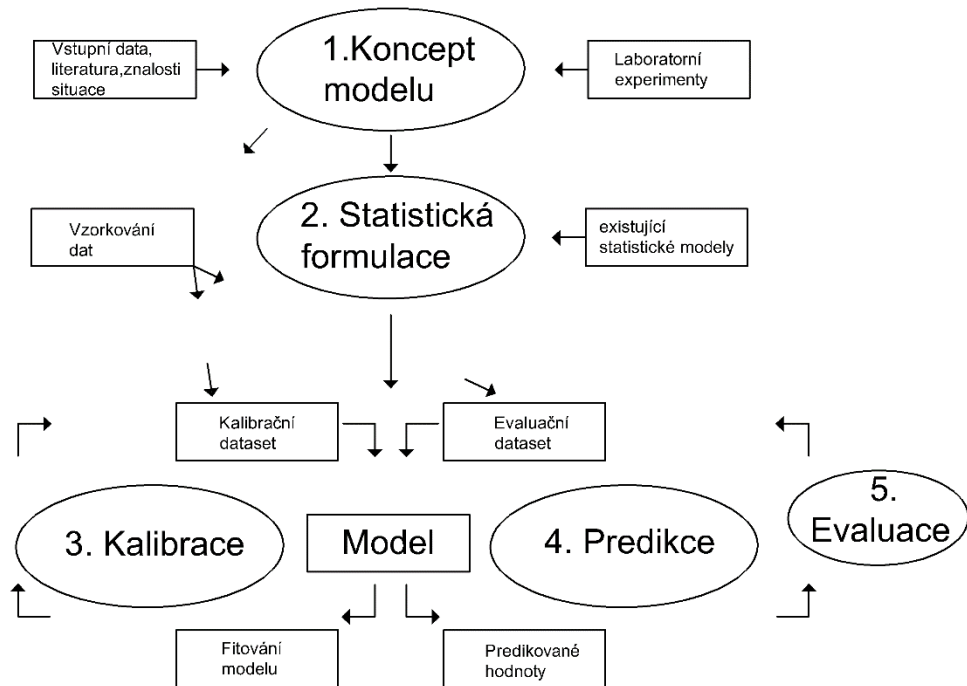
Současné SDM jsou založeny na konceptu ekologické niky, jak ji definoval Hutchinson (1957). Hutchinson (1957) definuje environmentální niku jako n-rozměrný prostor, určený faktory environmentálních proměnných, ve kterém může popisovaný druh existovat. Každá environmentální proměnná definuje jednu dimenzi n-rozměrného prostoru. Dle Hutchinsona lze environmentální niku dále dělit na základní a realizovanou niku. Základní nika je množinou

kombinací všech environmentálních proměnných, které umožňují druhu v daném místě přežít. Realizovaná nika je množina oblastí, kde se druh skutečně vyskytuje. Realizovaná nika je podmnožinou niky základní a zpravidla bývá menší než základní nika. Důvod rozdílu velikostí těchto nik vychází z rozdílných definic. Základní nika vylučuje všechny biotické faktory, kladné či záporné (např. predace, symbióza, parazitismus, kompetice). V tomto scénáři by byl druh potenciálně schopen osídlit všechny habitaty, vyhovující z hlediska environmentálních podmínek. Skutečnosti bližší ekologická nika, která zahrnuje biotické interakce, vymezuje prostor, kde můžeme druh opravdu nalézt (Kearney, Porter 2004). Příklad 2-rozměrné environmentální niky ilustruje obrázek níže (Obr.1).



Obrázek 1: Příklad 2-rozměrné ekologické niky dle Miller 2010 Zeleně jsou vyznačeny zaznamenané výskyty druhu. Oranžově je vyznačena potencionální nika, kde je druh schopný prosperovat. Modře je zobrazena realizovaná nika – podmnožina niky potencionální, kterou druh skutečně obývá. (zdroj: autor)

Tvorba SDM se skládá ze 5 na sebe navzájem navazujících kroků, a to: vytvoření koncepce, příprava dat pro vložení do modelu, uzpůsobení modelu pro jednotlivé druhy, posouzení modelu, prostorová predikce a odhad aplikovatelnosti modelu (Obr. 2) (Guisan, Zimmermann 2000).



Obrázek 2: Obecné schéma fungování SDM dle Guisan a Zimmermann 2000 (zdroj: autor)

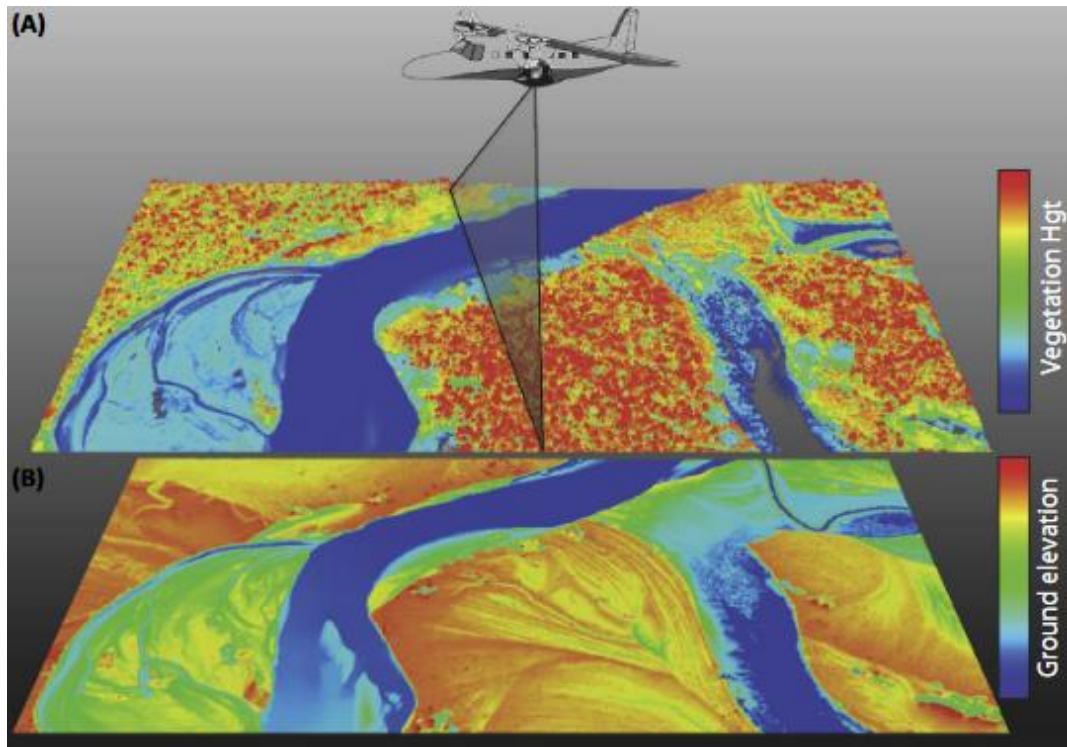
Pro přípravu modelu druhové distribuce (SDM) jsou naprosto klíčová vstupní data. Při tvorbě SDM vstupní data můžeme rozdělit na výskytová data (záznam o tom, kde se druh vyskytuje) a na environmentální data (Miller 2010). Příkladem druhových dat jsou GPS data záznamů výskytů, nebo atlasová data, příkladem environmentálních dat mohou být topografická data, data o struktuře ekosystému, nebo klimatické proměnné (Davies, Asner 2014, Pecchi et al. 2019). Velmi komplexní přehled zdrojů environmentálních dat uvádí ve své práci Miller (2010) (Tab. 1).

Tabulka 1: Otevřené zdroje dat dle Miller 2010 (zdroj: autor)

Otevřené zdroje biologických dat		
Organizace	URL	Specifikace dat
Global Biodiversity Information Facility	http://data.gbif.org/welcome.htm	rostlinné a živočišné druhy, houby, mikroorganismy
National Invasive Species Information Center	http://www.invasivespeciesinfo.gov/resources/regdb.shtml	Americké a regionální databáze invazivních druhů
North American Breeding Bird Survey	http://www.pwrc.usgs.gov/BBS/	Data více než 400 ptačích druhů
VertNet	http://vertnet.org/index.php	
Otevřené zdroje environmentálních dat		
WorldClim	http://www.worldclim.org/	Interpolované klima pro zemský povrch v rozlišení 1 km
PRISM	http://www.prism.oregonstate.edu/index.phtml	Interpolované klima pro USA (měsíční, roční, historické) v rozlišení 800 m nebo 4 km
Global elevation and related data	http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/Elevation_Products	Nadmořská výška a související proměnné pro zeměkouli s rozlišením 1 km
National Map	http://seamless.usgs.gov/	Interpolované datové sady (výška, snímky, NDVI)
UNEP	http://www.grid.unep.ch/data/data.php?category=lithosphere	Mapy světových půdních typů
NRCS	http://soildatamart.nrcs.usda.gov/USDGSM.aspx	Mapy půdních typů pro USA

Klíčovým přínosem pro SDM byly nové metody dálkového průzkumu země (LiDAR, satelitní systémy) a geografických informačních systémů. (Miller 2010). LiDAR je aktivní technikou dálkového průzkumu země. Zatímco satelitní snímky a letecké fotografie zaznamenávají odražené sluneční záření, LiDAR emituje krátkodobé laserové pulzy, které se odráží od cíle a podle času návratu určují jeho pozici ve 3 rozměrech (Obr. 3). Vlnová délka světelného pulzu emitovaného LiDARem se typicky nachází v rozmezí 900–1100 nm. Pro tento rozsah vlnových délek je olistění vegetace částečně prostupné, což umožňuje určovat vertikální distribuci. LiDAR je tak schopen modelovat struktury od povrchu v celém vertikálním spektru ekosystému. LiDAR skenery jsou běžně umísťovány do letadel, kde jsou schopna modelovat velká území. Tento předpoklad je důležitý, neboť cena průzkumů je vysoká. I přesto však existují i pozemní přístroje. LiDAR je v ekologii vysoce ceněný pro svoji schopnost rychle a

přesně zmapovat strukturu ekosystému (Davies, Asner 2014). Prostorové uspořádání ekosystému a tvar terénu udávají vlastnosti jednotlivých stanovišť jako je mikroklima, nebo diverzita. Tyto vlastnosti se mění v ekosystému lokálně. Pro zvířata mohou mít tyto vlastnosti dopady přímé, kdy druhy přímo interagují se strukturou stanoviště např. šplhající primáti, hnízdící ptáci. Nepřímé dopady pak druhy ovlivňují např. množstvím dopadajícího světla nebo místní relativní vlhkosti (Davies, Asner 2014).



Obrázek 3: Modelování struktury vegetace a topografie pomocí leteckého lidarů (zdroj: Davies, Asner 2014)

Počet výskytových záznamů (množství výskytů) ovlivňuje přesnost modelu druhové distribuce (Moudrý, Šímová P. 2012). Vztah mezi počtem výskytových záznamů a přesností modelu záleží na vybrané metodě modelování. Velikost vzorku nejméně ovlivňuje modelovací metodu Maxent, která je schopná udržovat vysokou přesnost i při malých velikostech datových souborů (5, 10, 25 pozorování). Malé velikosti souborů prostorových dat naopak velice špatně snáší metoda Bioclim (Hernandez et al. 2006). Zvyšující se množství záznamu zvyšuje přesnost modelu až do dosažení prahové hodnoty (udává se kolem 300 bodů), po překročení této hodnoty již nemá větší množství výskytových dat vliv na přesnost, (Gábor et al. 2020).

Pro tvorbu modelu je důležitá volba správné modelovací metody. Modelovací metody, můžeme dělit podle toho jaká vstupní výskytová data používají: prezenční, prezenčně absenční a pseudo absenční. Modelovací metody také můžeme dělit podle mechanismu na

kterém jsou založeny. Regresní modely zahrnují mnoho různých modelů, založených na General linear models (GLMs) (Baxter 1990). Tyto modely lineárně spojují data o výskytu druhů s řadou environmentálních proměnných. Díky tomu lze modely jasně interpretovat. Jsou však náchylné na autokorelace klimatických proměnných (Li D. et al. 2015). Generalizované additive models (GAMs) jsou odvozené od GLMs. Nahrazují lineární prediktor neparametrickou, nebo semiparametrickou funkcí, díky které jsou vhodnější při popisu složitějších interakcí druh – prostředí (Grego 2013). Další kategorií metod jsou metody strojového učení (machine-learning). Tyto pracují na principu klasifikačních a regresních stromů. Výhodami těchto metod je (i) schopnost zpracovat širokou škálu typů proměnných včetně číselných, kategoriálních a údajů o přežití (ii) snadnost a robustnost konstrukce (iii) schopnost zvládnout chybějící hodnoty v odpovědích i vysvětlujících proměnných. Jsou tedy velmi flexibilní a analytickou metodou, vhodnou pro analýzu komplexních environmentálních dat (De'ath, Fabricius 2000). Nejčastěji používanými modely využívající metody strojového učení jsou Maxent a RandomForest (RF). RandomForest je založen na náhodné kombinaci sérií klasifikačních a regresních stromů. Vykazuje výborné výsledky při nastavení výrazně většího počtu proměnných ku počtu pozorování. Je dostatečně univerzální pro tvorbu modelů na velkém území a lehce se přizpůsobuje různým typům zadání (Biau, Scornet 2016). Maxent pracuje na principu nalezení maximální entropie modelu. Vypočítává relative occurrence rate (ROR) ze zadaných výskytových dat a generovaných background-points z prostředí. Maxent popisuje ROR jako funkci environmentálních proměnných v místě. Z ROR lze transformací, nazývanou logistic output, vyjádřit pravděpodobnost výskytu. Maxent je obecně lepší v přesnosti predikce než ostatní modely a příprava používání modelu je poměrně jednoduchá (Merow et al. 2013). Pro jednoduchost jsou jednotlivé metody a jejich rozdělení uvedeny v tabulce níže (Tab.2).

Tabulka 2: Přehled vybraných modelovacích metod (zdroj: autor)

Název metody	Zkratka	Typ modelu	Typ dat
General linear model	GLM	regresní	prezenční
General additive model	GAM	regresní	prezenční
Maxent	-	strojové učení	prezenční / background points
BioClim	BC	strojové učení	prezenčně-absenční
Random Forest	RF	strojové učení	prezenční

Evaluaci modelu zjišťujeme, jak přesně výsledný model odráží skutečnost. Ke správné validaci modelu je zapotřebí rozdělit data pro trénování modelu a pro jeho testování. Můžeme použít několik přístupů jako je cross-validation, bootstrapping, nebo subsampling (Araújo, Rahbek

2006). Subsampling dělí dataset na trénovací set a testovací set. Obvykle 2/3 trénovací set a 1/3 testovací set. Trénovací set je vložen do modelu a následně je model porovnáván s testovacím setem pro určení přesnosti modelu. Subsampling tento proces n-krát opakuje a jako výslednou přesnost získává jako průměr z jednotlivých testů. Problémem této metody je dělení dat na testovací a tréninkový set, kdy při zmenšení tréninkového setu dochází ke zvětšení chyby v odhadu. Při zmenšení testovacího setu se naopak zvětšuje confidence interval. Bootstrapping využívá při validaci modelu n rovnoměrně vybraných vzorků, které nahrazuje v původním datasetu. Na takto vzniklé sadě je model trénován. Model poté pomocí resubstituce vrací přesnost vypočtenou na celém datasetu. Cross-validation rozděluje dataset náhodně do n-subsetů přibližně stejné velikosti. Poté je dataset n-krát trénován a testován trénován je na je na n-1 subsetech a testován pokaždé na jiném subsetu. Přesnost modelu vypočítává jako počet správných klasifikací ku celkovému počtu záznamů v subsetu. Výsledná přesnost je průměrem všech opakování (Kohavi 1995). K posouzení přesnosti modelu se nejčastěji používají metriky založené na confusion matrix (*Obr. 4*) jsou založeny na porovnání pozorovaných dat k predikovaným datům. Běžné metriky confusion matrix jsou: PCC (Percent correctly classified), Kappa, Sencitivity, specificity, PPP (Proportion of predicted presence correctly predicted), NPP (Proportion of predicted absence correctly predicted), TSS (True skill statistic) (Miller 2010). Receiver-operating characteristic (ROC) pak porovnává senzitivitu oproti specificitě pomocí Area under curve (AUC) (Miller 2010). AUC je nejběžněji používaná evaluační metrika pro Maxent modely (Merow et al. 2013).

	Zaznamenaná prezence	Zaznamenaná absence
Predikovaná prezence	skutečně pozitivní	falešně pozitivní
Predikovaná absence	skutečně negativní	falešně negativní

Obrázek 4: Obecné schéma confusion matrix (zdroj: autor)

3 Metodika

3.1 Použitý software

K posouzení vlivu klimatických změn na geografické rozšíření ptačích druhů byl statisticky software R v uživatelsky přívětivém prostředí Rstudio (R ve verziv 4.0.3, Rstudio verze 2022.02.1+461 "Prairie Trillium"). Program je volně dostupný z www.r-project.org. K tvorbě SDM bylo použito několik dalších volně dostupných extenzí programu R tzv. packages (sp, sf, sdm, raster, rgdal, usdm, RCzechia, maptools, ggplot2, dplyr, recipes, flexsdm, sqldf, maps, testthat, roxygen2, RStoolbox, cowplot).

3.2 Popis zájmového území

Bakalářská práce se zabývá posouzením vlivu klimatických změn na geografické rozšíření ptačích druhů. Pro posuzování vlivu bylo stanoveno zájmové území, které kopíruje geografické hranice České republiky. Zájmové území bylo voleno v souvislosti s rozložením výskytových dat, která byla sbírána právě na území České republiky. Zájmové území se rozkládá mezi 48. a 52. stupněm severní šířky a 12. a 19. stupněm východní délky. Nejvýše položený bod dosahuje výšky 1 602 m.n.m., nejnižší pak 115 m.n.m.. Střední nadmořská výška dosahuje hodnoty 430 m.n.m.. Zájmové území se vyznačuje mísením oceánského a kontinentálního klimatu. V Čechách převládá klima oceánské, ve Slezsku na Moravě klima kontinentální. Česká republika se dělí na 2 biogeografické provincie – provincie středoevropských listnatých lesů a panonská provincie. Výrazně převládá provincie středoevropských listnatých lesů. Provincie jsou dále děleny do 4 podprovincií – hercynská, polonská, západokarpatská a severopanonská, které se dělí na 91 bioregionů.

3.3 Výskytová data

Výskytová data ptačích druhů byla získána z Nálezové databáze ochrany přírody AOPK ČR. Do formy, která je používána v bakalářské práci jako vstupní data byla data upravena inženýrem Petrem Balejem za pomoci aplikace NDOP Downloader. Výskytová data jsou tvořena databází o 1 698 103 pozorováních. Ke každému záznamu je uvedeno ID, název pozorovaného druhu, souřadnice místa pozorování, přesnost pozorování a datum pozorování. Názvy druhů jsou uvedeny latinsky. K uvedení místa pozorování je použit souřadnicový systém SJTSK. Přesnost pozorování je uváděna v intervalu 0–10 km.

Výskytová data byla rozdělena na výskytová data jednotlivých druhů. Následně byly vybrány takové datasey, které vyhovovali počtem pozorování. Vybrány byly datasey s počtem 70–90 pozorování. Datasey s vyšším počtem pozorování byly vynechány z důvodů omezení

výpočetní techniky použité při tvorbě modelu. Zvoleny byly výskytová data těchto druhů: Volavka vlasatá (*Ardeola ralloides*), Jespák písečný (*Calidris alba*), Ústřičník velký (*Haematopus ostralegus*), Rybák bělokřídlý (*Chlidonias leucopterus*), Budníček zelený (*Phylloscopus trochiloides*).

Výskytová data bylo potřeba vyfiltrovat kvůli snížení sampling bias (Gábor et al 2020). K filtrování datasetů byl použit enviromentální filtr (Varela et al 2014, Gábor et al 2020). Filtrování pomocí enviromentálního filtru zlepšuje kvalitu dat a je běžně používáno při tvorbě SDM. Enviromentální filtr používá pro filtrování rozdělení enviromentálního prostoru dle námi vybraných klimatických proměnných. Velikost jednotlivých gridů i počet proměnných volíme v závislosti na konkrétních datasetech (Varela et al. 2014). Pro filtrování vybraných datasetů byly použity enviromentální proměnné izotermie a sezónnost srážek ve formě variačního koeficientu. Tyto proměnné byly vybrány v závislosti na výpočtu VIF, který určil minimální korelaci mezi těmito konkrétními proměnnými. Pro izotermii, která nabývá na území České republiky hodnot od 24,31 do 32,93 % byl grid nastaven na 0.5. Variační koeficient sezónnosti srážek se na území České republiky pohybuje v rozmezí 15 až 47,56 %. Grid pro tuto proměnnou byl nastaven na 1.5. Velikost gridu environmentálního filtru byla takto určena z důvodu zlepšení výsledné hodnoty AUC oproti nefiltrovaným datům.

3.4 Klimatická data

Pro posouzení vlivu klimatické změny na geografické rozšíření ptačích druhů byly použity klimatická data z databáze WorldClim (Fick, Hijmans 2017, s.4304). WorldClim obsahuje soubor interpolovaných klimatických vrstev popisující vybrané proměnné. Jednotlivé vrstvy popisují průměrnou roční teplotu, průměrný denní rozsah teplot, izotermii, teplotní sezónnost, maximální teplotu v nejteplejším měsíci, minimální teplotu v nejchladnějším měsíci, roční rozsah teplot, průměrnou teplotu nejvlhčího čtvrtletí, průměrnou teplotu nejsuššího čtvrtletí, průměrnou teplotu nejteplejšího čtvrtletí, průměrnou teplotu nejchladnějšího čtvrtletí, celkové roční srážky, srážky v nejdeštivějším měsíci, srážky v nejsušším měsíci, variační koeficient sezónnosti srážek, srážky v nevlhčím, nejsušším, nejteplejším a nejchladnějším čtvrtletí. WorldClim poskytuje data v různých rozlišeních. Pro účely bakalářské práce bylo použito nejlepší z dostupných rozlišení – přibližně 1x1 km. Pro účely bakalářské práce byly použity dva datasety z databáze WorldClim. Jeden dataset prezentující současné hodnoty proměnných. Druhý dataset predikovaných hodnot stejných proměnných, který prezentuje pravděpodobné klima pro rok 2050 (CMIP5). Dataset byl modelován globálním klimatickým modelem NorESM1-M. Pro prediktivní model byl vybrán scénář s relativně vysokými emisemi skleníkových plynů (rcp85). Pro tvorbu SDM bylo

zapotřebí upravit vstupní klimatická data. Data byla převedena do souřadnicového systému S-JTSK. Následně bylo zapotřebí oříznout jednotlivé klimatické vrstvy do tvaru zájmového území. K tomuto účelu byla použita extenze programu R RCzechia, která obsahuje geografické objekty ČR. S pomocí této extenze byl vytvořen dataframe hranic ČR, následně byl převeden do souřadnicového systému S-JTSK. Klimatická data, současná i budoucí, byla oříznuta takto připravenou maskou zájmového území. Po oříznutí dat, které zmenšilo jejich velikost a umožnilo rychlejší práci s daty, byla data testována na korelaci. K testu byl použit výpočet variačního inflačního faktoru (VIF) který byl schopen vyloučit vysoce korelované proměnné. Tato metoda bývá běžně používána k řešení problémů s multikolinearitou (R Core Team, 2021). Výpočtem bylo vyloučeno 13 z 19 environmentálních proměnných z důvodu vzájemné korelace. Pro další práci byly vybrány tyto environmentální proměnné: izotermie, teplotní sezónnost, minimální teplotu v nejchladnějším měsíci, průměrnou teplotu nejsuššího čtvrtletí, srážky v nejdeštivějším měsíci a variační koeficient sezónnosti srážek. Enviromentální proměnné z CMIP5 byly vybrány podle výsledků výpočtu VIF pro současné environmentální proměnné.

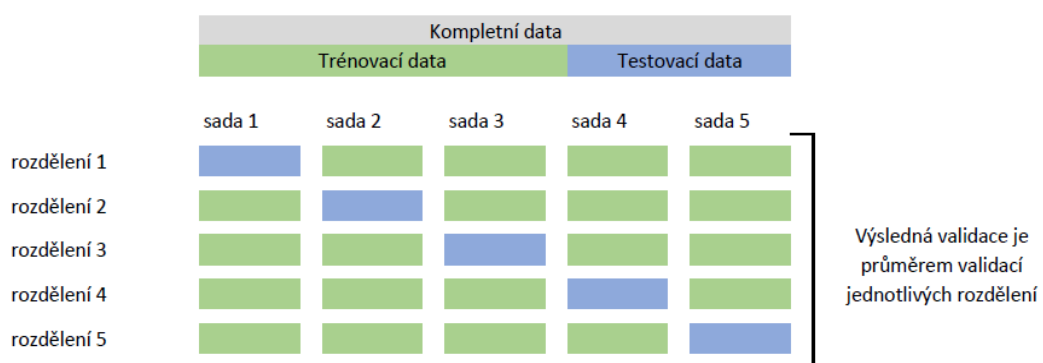
3.5 Příprava modelu

Pro tvorbu SDM byla zvolena modelovací metoda Maxent. Maxent je nejčastěji používaná modelovací metoda při použití SDM v ekologii (např: Merow et al. 2013, West et al. 2016, Wiese et al. 2019, Kaky et al. 2020, Li Z. et al. 2022). Tato metoda má několik výhod, které ji upřednostňují před dalšími metodami. Maxent pracuje s prezenčními daty, ke kterým generuje background points a dosahuje vysoké přesnosti i s datasey s nízkým počtem zaznamenaných výskytů (Elith et al. 2011). Tato vlastnost vyhovuje kvůli kvalitě výpočetní techniky, použité k tvorbě SDM. Modelovací metoda Maxent, použitá pro potřeby bakalářské práce, byla použita v defaultním nastavení. Pro potřeby modelu bylo náhodně vygenerováno 10 000 background points. Takto nastavené modely jsou v ekologii běžně používány, z důvodů dobrého poměru mezi nároky modelu a jeho kvalitou (Elith et al 2011, Merow et al. 2013, Kaky et al. 2020)

3.6 Evaluace modelu

Model byl evaluován pomocí metody cross-validation. Metoda dělí data na testovací a trénovací sady (*Obr. 5*). Dataset byl rozdělen na 5 sad, z nichž vždy 1 byla testovací sada a zbylé trénovací. Výsledná hodnota přesnosti modelu je pak průměrem jednotlivých testů. Přesnost modelu byla posuzována pomocí hodnoty AUC. Jako mezní hodnota AUC pro indikaci vyhovující predikční schopnosti modelů byla zvolena hodnota 0.8. Modely s vyšší, než stanovenou hodnotou AUC byly shledány za vyhovující. Mezní hodnota 0,8 byla zvolena

s ohledem na kompromis mezi predikčními schopnosti modelu a dosažitelností této hodnoty pomocí dostupné výpočetní techniky. Mezní hodnota 0.8 byla shledána vyhovující, neboť s hodnotami blízkými této hodnotě bývá obecně uvažováno jako s dostatečnými (Kaky et al. 2020, Li, Z. Et al 2022). Určení vhodných habitatů vychází z predikce výskytu. Za vhodné habitaty pro výskyt druhu byly považovány oblasti, kde pravděpodobnost výskytu přesáhla hodnotu 0.8. S touto hodnotou se obecně uvažuje jako s dostatečnou pro určení prezence druhu (Hirzel et al. 2002, Gogol-Prokurat 2011). Takto získané současné a budoucí vhodné habitaty byly zkombinovány do výsledného rastru, který nabývá hodnot $c \in (-1,0,1)$ a udává změnu geografického rozložení vhodných habitatů.



Obrázek 5: schéma metody Cross-validation (zdroj: autor)

4 Výsledky

Výsledkem této práce jsou predikční modely druhové distribuce pro vybrané druhy. Výsledky jsou prezentovány ve formě současné predikce výskytu a predikce výskytu v roce 2050. Pro každý vybraný druh byly výsledky zpracovány ve formě vlastního výstupu. Poté byly změny v geologické distribuci jednotlivých druhů vzájemně porovnány. Hodnoty AUC jednotlivých modelů se pohybují v intervalu 0.8–0.96 což indikuje dobrou až výbornou predikční schopnost jednotlivých modelů.

Všechny vytvořené modely predikují změny v rozlohách habitatů (Obr. 6). Všechny modelované druhy reagují na změny klimatu změnou velikosti prostorové distribuce vhodných habitatů. Můžeme pozorovat procentuální nárůst vůči současným habitatům u všech modelovaných druhů, vyjma Budníčka zeleného. Tento nárůst indikuje změnu distribuce druhu, směrem do nových oblastí. U některých druhů také pozorujeme úbytek habitatů vůči současnému stavu. Úbytek indikuje ztrátu vhodných habitatů v místech současného výskytu, a tedy změnu distribuce druhu, kvůli zániku habitatů. V kapitolách níže jsou podrobněji popsány modely jednotlivých druhů, jakož i geografická distribuce vhodných habitatů.

4.1 Volavka vlasatá (*Ardeola ralloides*)

Model pro predikci změny habitatu Volavky vlasaté dosahuje hodnoty AUC 0.96. V současnosti se vhodný habitat rozkládá na jihu Moravy v okolí Znojma a v oblastech v okolí Prahy (Obr. 7). Do roku 2050 predikce předpokládá rozšíření vhodných habitatů o 2 160,18 % vůči současným habitatům. Nově vzniklé habitaty se rozkládají od východu na západ v pásu zahrnujícím východní a jižní Moravu, jižní, západní a severní Čechy. Úbytek vhodných habitatů do roku 2050 nebyl na území ČR modelem predikován.

4.2 Jespák písečný (*Calidris alba*)

Pro Jespáka písečného jsou v České republice v současnosti vhodné jen málo rozlehlé habitaty v oblasti mezi Českými Budějovicemi a Prahou, v severovýchodních Čechách podél řeky Ohře a na jižní Moravě v okolí Znojma (Obr. 8). Do roku 2050 dojde k nárůstu vhodných habitatů a to o 924,08 %. V roce 2050 budou vhodné habitaty pokrývat téměř celou Vysočinu, většinu jižních, východních a severních Čech a oblasti na severní a západní Moravě. Vhodných habitatů pro Jespáka písečného v ČR ubude hlavně na jižní Moravě a v malých oblastech v Čechách. Celkově ubude 46.33 % současných habitatů. Model predikující tyto výstupy dosahuje hodnoty AUC 0.84

4.3 Ústříčník velký (*Haematopus ostralegus*)

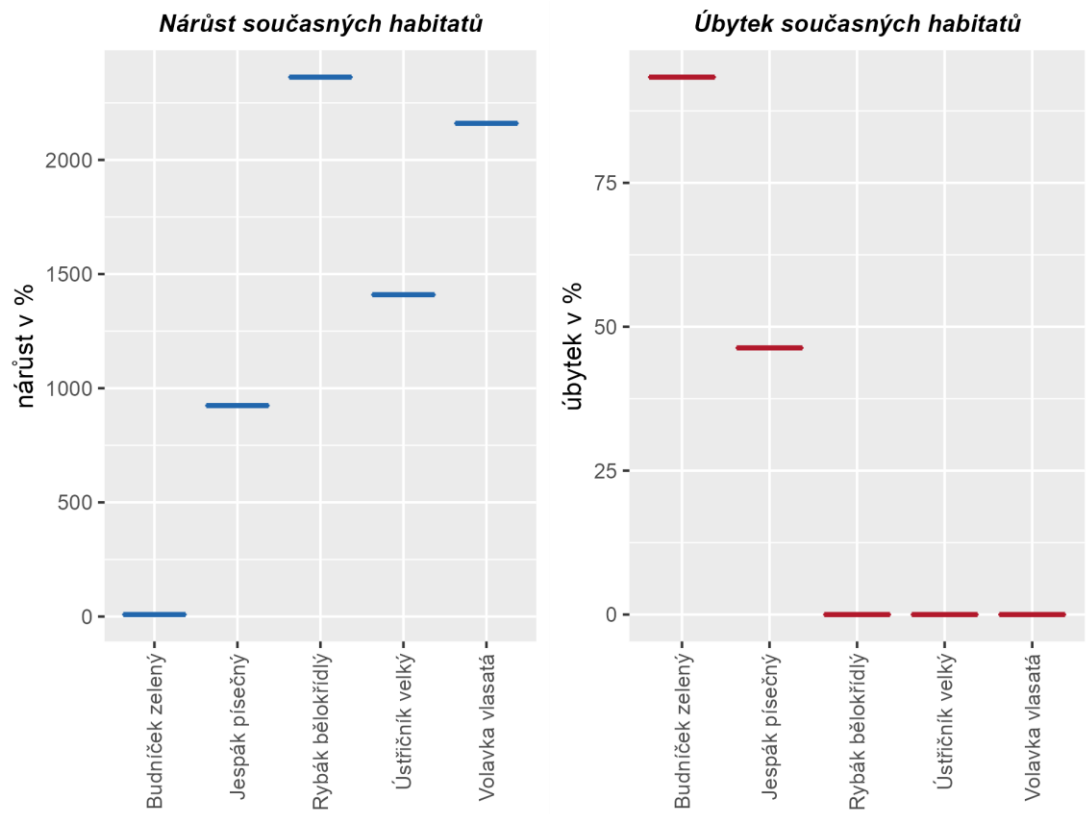
V současnosti se vhodný habitat pro výskyt Ústříčníka velkého rozkládá v Čechách v okolí Prahy a na severozápadě Čech, na jižní Moravě v okolí Znojma (Obr. 9). Prediktivní model, kterým byl habitat vymodelován dosahuje hodnoty AUC 0.8. Predikovaný vhodný habitat v roce 2050 porývá téměř celé území České republiky, s výjimkou oblastí v nejvyšších nadmořských výškách a drobných oblastí na západě Čech. Do roku 2050 se budoucí habitat oproti současnému rozroste o 1 409,62 %. Úbytek současných habitatů není predikován.

4.4 Rybák bělokřídlý (*Chlidonias leucopterus*)

Hodnoty modelu predikce geografické distribuce Rybáka Bělokorého dosahují hodnoty AUC 0.9. Současné vhodné habitaty jsou situovány na jižní Moravě a v okolí Prahy (Obr. 10). Veškeré současné habitaty zůstanou až do roku 2050 zachovány, navíc se vhodné habitaty rozrostou o 2 362,52 % oproti současnému stavu. V budoucnu budou predikované habitaty pokrývat téměř celou Českou republiku, vyjma příhraničních regionů ve vysokých nadmořských výškách a oblastí v západních Čechách.

4.5 Budníček zelený (*Phylloscopus trochiloides*)

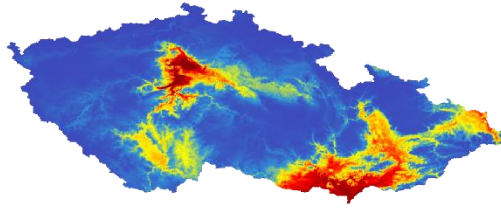
Model predikce druhové distribuce Budníčka zeleného dosahuje hodnoty AUC 0.87. V současnosti se vhodné habitaty pro Budníčka zeleného rozkládají hlavně v oblasti Krkonoš, drobné oblasti se vyskytují i na západě a východě Slezska (Obr. 11). Současné habitaty se do roku 2050 redukují o 93,36 % vůči současným habitatům. V České republice vzniknou i nové habitaty, avšak poměrem jen 8,75 % současných habitatů.



Obrázek 6: Změny rozlohy habitatů (zdroj: autor)

Volavka vlasatá (*Ardeola ralloides*)

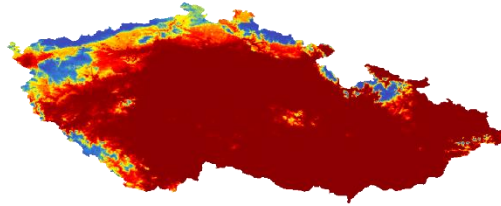
SOUČASNÁ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



SOUČASNÉ VHODNÉ HABITATY



BUDOUCÍ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



BUDOUCÍ VHODNÉ HABITATY



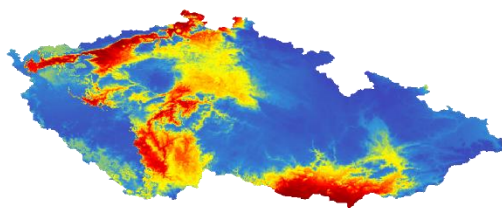
ZMĚNA V ROZLOZE HABITATŮ



Obrázek 7: Geografická distribuce habitatu Volavky vlasaté (zdroj: autor)

Jespák písečný (*Calidris alba*)

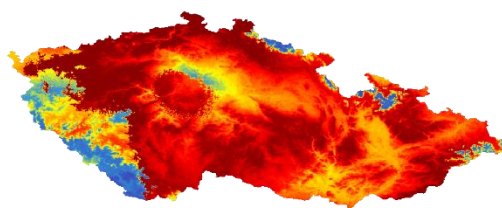
SOUČASNÁ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



SOUČASNÉ VHODNÉ HABITATY



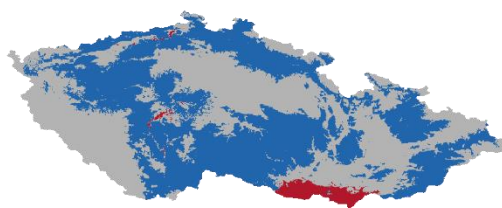
BUDOUCÍ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



BUDOUCÍ VHODNÉ HABITATY



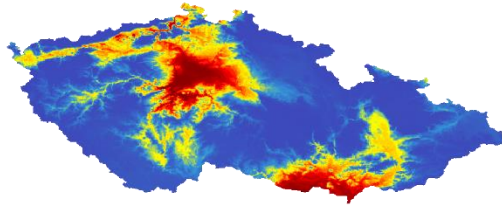
ZMĚNA V ROZLOZE HABITATŮ



Obrázek 8: Geografická distribuce habitatu Jespáka písečného (zdroj: autor)

Ústříčnák velký (*Haematopus ostrolegus*)

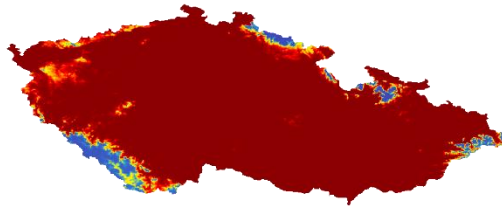
SOUČASNÁ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



SOUČASNÉ VHODNÉ HABITATY



BUDOUCÍ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



BUDOUCÍ VHODNÉ HABITATY



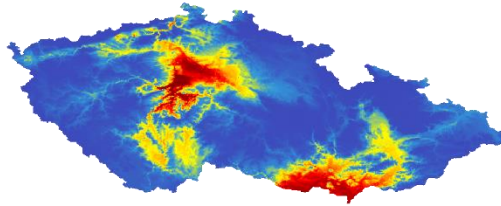
ZMĚNA V ROZLOZE HABITATŮ



Obrázek 9: Geografická distribuce Ústříčníka velkého (zdroj: autor)

Rybák bělokřídlý (*Chlidonias leucopterus*)

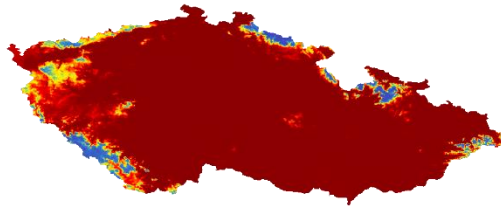
SOUČASNÁ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



SOUČASNÉ VHODNÉ HABITATY



BUDOUCÍ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



BUDOUCÍ VHODNÉ HABITATY



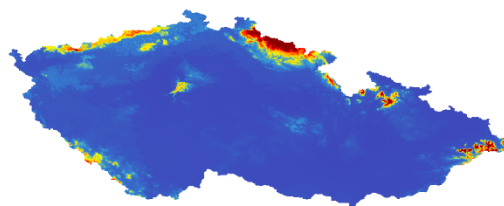
ZMĚNA V ROZLOZE HABITATŮ



Obrázek 10: Geografická distribuce Rybáka bělokřídleho (zdroj: autor)

Budníček zelený (*Phylloscopus trochiloides*)

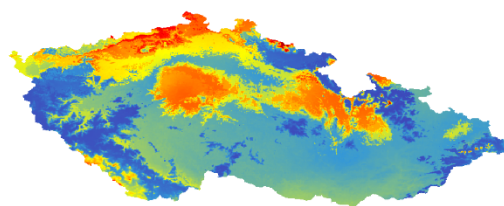
SOUČASNÁ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



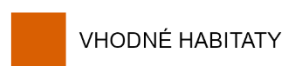
SOUČASNÉ VHODNÉ HABITATY



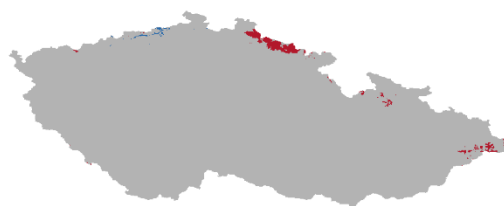
BUDOUCÍ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU



BUDOUCÍ VHODNÉ HABITATY



ZMĚNA V ROZLOZE HABITATŮ



Obrázek 11: Geografická distribuce Budníčka zeleného (zdroj: autor)

5 Diskuze

Výsledky modelů prokazatelně demonstrují změny v geografické distribuci vybraných druhů. U všech vybraných druhů se mění geografická distribuce vhodných habitatů. Tyto výsledky korespondují s dalšími výzkumy v této oblasti (například Araújo, Rahbek 2006, Bellard et al. 2012, Gaüzère et al. 2017).

Veškeré modely vypracované v rámci této bakalářské práce predikují rozšíření vhodných habitatů vybraných druhů. Bylo by ale zavádějící aplikovat tento závěr na všechny ptačí druhy v České republice. Podíváme-li se na vybrané ptačí druhy, můžeme si všimnout rozložení současné geografické distribuce, které s tímto jevem souvisí. Druhům, které se v současné době vyskytují na jižní Moravě, nebo v jiných nížinných oblastech (Rybák bělokřídlý, Ústříčnick velký, Volavka vlasatá) vyhovuje oteplování klimatu, které umožňuje jejich rozšíření do vyšších nadmořských výšek. Naopak u druhů, které se v těchto středních výškách (bráno relativně k výškovému rozložení České republiky) v současnosti vyskytují, je zaznamenán úbytek vhodných habitatů v těch nejnižší položených oblastech. Pořád se ale na území České republiky vyskytují takové lokality, které budou pro tyto druhy vhodné i při přihlédnutí ke změně klimatu (Jespák písečný). V případě aplikace tohoto modelu na druh, který se v současnosti vyskytuje jen v horských oblastech, například Budníček zelený, vhodné habitaty na území České republiky ubývají, právě v důsledku oteplení klimatu i v nejnižší položených oblastech.

Další důležitou věcí je pochopení omezení modelů vytvořených v této bakalářské práci. Modely prezentují vhodné habitaty pouze z klimatického hlediska. Jedná se jen o jeden rozměr ve vícerozměrném prostoru vyjadřujícím vhodný habitat.

Pro zpřesnění vytvořených modelů by bylo vhodné vložit do modelů více proměnných. Při tvorbě modelů v tomto měřítku by bylo nejvhodnější použití proměnných odvozených z lidarů, například výšku a strukturu vegetace nebo topografické index vlhkosti (Davies, Asner 2014). Tyto proměnné nabývají velké významnosti, zejména u ptačích druhů, které jsou předmětem této bakalářské práce (Šímová I. et al. 2018, Moudrý et al. 2023). Nevýhodou těchto proměnných je velký datový objem. Z tohoto důvodu nebyly tyto, ani další jiné, proměnné použity, protože výpočetní technika použitá pro tvorbu modelů nedosahuje dostatečné výpočetní kapacity.

Dalším omezením je geografická dostupnost vhodných habitatů. U ptačích druhů většinou tento problém nenastává, ale u druhů s menší schopností pohybu je nutná souvislá síť

biokoridorů, které pomohou při přesunech druhu do potenciálně vhodných oblastí. Jako omezení se také jeví nezahrnutí interakce vybraného druhu s druhy již existujícími v novém habitatu. Interakce mezi druhy může mít jak pozitivní formy (symbióza, kooperace), tak negativní dopady (predace, kompetice).

I přes všechna omezení, kterými vytvořené modely disponují, nám dávají náhled na budoucí stav rozšíření druhů. Ačkoliv může být tento náhled zkreslený, z důvodů uvedených výše, výstupy jsou vhodné jako prvotní predikce v rámci studie. Díky relativní nenáročnosti na objemy vstupních dat a relativní rychlosti tvorby modelů v poměru k přesnosti predikce jsou tyto modely vhodným odrazovým můstkem pro přesnější studie.

Důležité je také říci, že v celkovém měřítku nemá klimatická změna na biodiverzitu ten nejvýraznější vliv. Daleko více se projevují dopady antropogenního znečištění, přílišného využívání zdrojů a změna využívání krajiny, kdy dochází ke tvorbě monokultur na úkor, často těch nejvýznamnějších ekosystémů (Luiza-Andrade et al. 2017). Neznamená to ale absenci vlivu klimatické změny na globální biodiverzitu. Pozorováním byla zjištěna signifikantně výraznější akumulace tepla v oceánech než na pevninách, která způsobuje změny vzdušného a oceánského proudění závislé na určitém rozdílu teplot (Abraham 2013). Vliv klimatické změny je v současnosti patrnější v regionálním měřítku, na místech kde jsou ekosystémy na změny velmi náchylné například oblasti s dlouhodobě stálým klimatem, nebo tam kde převládají rostlinné monokultury (Trew, MacLean 2021). Ani zde není vliv klimatické změny jediným faktorem ovlivňujícím biodiverzitu. V potaz musíme brát další faktory jako celkovou topografii terénu, lokální biocentra, nadmořská výška a oblasti z různých důvodů izolované, nebo odlišné (Willis, Bhagwat 2009, Gaüzère et al. 2017).

6 Závěr a přínos práce

Bakalářská práce si kladla za cíl shrnout obecné principy fungování modelů druhové distribuce a připravit model schopný predikce současné a budoucí geografické distribuce vybraných druhů. Na základě výsledků tohoto modelu pak byl posouzen vliv klimatických změn na geografické rozšíření vybraných druhů.

Výsledky práce prezentují predikce změn v geografickém rozložení druhové distribuce. Z prezentovaných výsledků můžeme konstatovat vliv klimatických změn na geografické rozložení druhové distribuce. V případě námi vybraných druhů se jedná o nárůst plochy vhodných habitatů o 8.75 až 2 362,52 % oproti současnému stavu. Na vybraných druzích je zřetelná změna geografické druhové distribuce, realizovaná pouze na základě změny klimatických proměnných. Pro jednotlivé vybrané druhy lze touto cestou popsat oblasti, které budou pro jednotlivé druhy vhodné a na základě této predikce může být rozhodnuto o potřebě ochrany, nebo způsobu podpory konkrétního ptačího druhu. Opatření mohou být například ve formě vyhlášení ptačích oblastí.

Přínosem této práce jsou vytvořené a nastavené modely druhové distribuce, které mohou být použity při predikci změny geografické distribuce pro jakýkoliv druh, máme-li dostatek výskytových záznamů.

Pro optimální využití přínosů této bakalářské práce je zapotřebí je však zapotřebí aplikovat tyto predikční modely ve větším měřítku. V ideálním případě by byly tyto modely aplikovány pro všechny druhy napříč všemi taxony, vyskytujícími se v České republice. Tyto predikční modely by mohli sloužit jako podklad pro vyhlášení zvláště chráněných území. Navíc by pomocí kombinace výsledků těchto modelů bylo možné určit budoucí potenciálně environmentálně nevhodnější oblasti. Zpracování této strategie by usnadnilo komplexní ochranu druhů a omezilo by střety zájmů ochrany a ekonomicko-sociálních zájmů na minimum.

7 Přehled literatury a použitých zdrojů

- Abraham, J. P., et al. (2013). A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change. *Rev. Geophys.*, 51, 450–483.
- Aguirre-Gutiérrez, J., Carvalheiro, L. G., Polce, C., van Loon, E. E., Raes, N., Reemer, M., & Biesmeijer, J. C. (2013). Fit-for-purpose: species distribution model performance depends on evaluation criteria—Dutch hoverflies as a case study. *PloS one*, 8(5), e63708.
- Araújo, M. B., and Guisan, A. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 33, 1677-1688.
- Araújo, M. B., & Rahbek, C. (2006). How does climate change affect biodiversity?. *Science*, 313(5792), 1396-1397.
- Baxter, M. (1990). *Generalised linear models* (2nd edition), by P. McCullagh and J. A. Nelder. Pp 511. £30. 1989. ISBN 0-412-31760-5 (Chapman and Hall). *The Mathematical Gazette*, 74(469), 320-321.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, 15(4), 365-377.
- Biau, G., Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. *Test*, 25, 197–227.
- Bond, N. R., Lake, P. S., & Arthington, A. H. (2008). The impacts of drought on freshwater ecosystems: an Australian perspective. *Hydrobiologia*, 600, 3-16.
- Buczynski, P., Przewozny, M., Zgierska, M. (2011). Biodiversity HOT SPOT and important refugium of the potamocoen? Aquatic beetles (Coleoptera: Adepaga, Hydrophiloidea, Staphylinodea, Byrrhoidea) of the River Bug valley between Wlodawa and Koden (Eastern Poland). *Acta Biologica*, 18, 49-84.
- Crowley, T. J. (2000). Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. *Science*, 289(5477), 270-277.
- Davies, A. B., Asner, G. P. (2014). Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(12), 681-691.
- De Matteis, A. (2019). Decomposing the anthropogenic causes of climate change. *Environ Dev Sustain*, 21, 165–179.
- De'ath, G., and Fabricius, K. E. (2000). Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*, 81, 3178-3192.
- Dietz, T., Shwom, R. L., & Whitley, C. T. (2020). Climate change and society. *Annual Review of Sociology*, 46, 135-158.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- Eur-Lex, © (2016). Pařížská dohoda. Dostupné z: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:22016A1019(01))
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., *et al.* (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environ Chem Lett*, 18, 2069–2094.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.

- García, F. C., Bestion, E., Warfield, R., Yvon-Durocher, G. (2018). Changes in temperature alter the relationship between biodiversity and ecosystem functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(43), 10989-10994.
- Franklin, J. (2010). *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gábor, L., Moudrý, V., Barták, V., & Lecours, V. (2020). How do species and data characteristics affect species distribution models and when to use environmental filtering?. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(8), 1567-1584.
- Gao, S., Zhou, T., Yi, Ch., Shi, P., Fang, W., Liu, R., Liang, E., Camarero, J. J. (2020). Asymmetric impacts of dryness and wetness on tree growth and forest coverage. *Agricultural and Forest Meteorology*, 288-289, 107980.
- Gaüzère, P., Princé, K., and Devictor, V. (2017). Where do they go? The effects of topography and habitat diversity on reducing climatic debt in birds. *Glob Change Biol*, 23, 2218-2229.
- Gogol-Prokurat, M. (2011). Predicting habitat suitability for rare plants at local spatial scales using a species distribution model. *Ecological Applications*, 21(1), 33-47.
- Grego, J. M. (2013). Generalized Additive Models. In *Encyclopedia of Environmetrics* (eds A.H. El-Shaarawi and W.W. Piegorsch).
- Guisan, A., Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 9(135), 147-186.
- Guisan, A., and Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993-1009.
- Haque, M. M., Rahman, A., Samali, B. (2016). Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production*, 137, 60-69.
- Hernandez, P. A., Graham, C. H., Master, L. L., and Albert, D. L. (2006). The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 29, 773-785.
- Hiatt, S. R., Grandy, J. B., Lee, B. H. (2015). Organizational Responses to Public and Private Politics: An Analysis of Climate Change Activists and U.S. Oil and Gas Firms. *Organization Science*, 26(6), 1769-1786.
- Hill, J. K., Griffiths, H. M., and Thomas, Ch. D. (2011). Climate Change and Evolutionary Adaptations at Species' Range Margins. *Annual Review of Entomology*, 56(1), 143-159.
- Hirzel, A. H., Hausser, J., Chessel, D., and Perrin, N. (2002). Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data?. *Ecology*, 83, 2027-2036.
- Hoffmann, A., Sgrò, C. (2011). Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, 470, 479-485.
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-422.
- Inman, R., Franklin, J., Esque, T., and Nussear, K. (2021). Comparing sample bias correction methods for species distribution modeling using virtual species. *Ecosphere*, 12(3), e03422.
- IPCC, © (2023). The Intergovernmental Panel on Climate Change. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/>
- Kaky, E., Nolan, V., Alatawi, A., Gilbert, F. (2020). A comparison between Ensemble and MaxEnt species distribution modelling approaches for conservation: A case study with Egyptian medicinal plants. *Ecological Informatics*, 60, 101150.

- Kaláb, O. (2019). NDOP Downloader – QGIS a Python modul, OpenGeoLabs. Dostupné z: <https://opengeolabs.github.io/qgis-ndop-downloader/>
- Kearney, M., and Porter, W. P. (2004). Mapping the fundamental niche: physiology, climate, and the distribution of a nocturnal lizard. *Ecology*, 85, 3119-3131.
- Kohavi, R. (1995). A study of Cross-validation and Bootstrap for Accuracy estimation and model selection. International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI).
- Koshkina, V., Wang, Y., Gordon, A., Dorazio, R. M., White, M., and Stone, L. (2017). Integrated species distribution models: combining presence-background data and site-occupancy data with imperfect detection. *Methods Ecol Evol*, 8, 420-430.
- Kramer-Schadt, S., Niedballa, J., Pilgrim, J. D., Schröder, B., Lindenborn, J., Reinfelder, V., Stillfried, M., Heckmann, I., Scharf, A. K., Augeri, D. M., Cheyne, S. M., Hearn, A. J., Ross, J., Macdonald, D. W., Mathai, J., Eaton, J., Marshall, A. J., Semiadi, G., Rustam, R., Bernard, H., Alfred, R., Samejima, H., Duckworth, J. W., Breitenmoser-Wuersten, C., Belant, J. L., Hofer, H., and Wilting, A. (2013). The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. *Diversity Distrib.*, 19, 1366-1379.
- Li, D., Wang, S., Li, D., Li, D., Wang, S., & Li, D. (2015). SDM Data Source. *Spatial Data Mining: Theory and Application*, 57-118.
- Li, Z., Liu, Y., Zeng, H. (2022). Application of the MaxEnt model in improving the accuracy of ecological red line identification: A case study of Zhanjiang, China. *Ecological Indicators*, 137, 108767.
- Luiza-Andrade, A., Brasil, L. S., Benone, N. L., Shimano, Y., Farias, A. P. J., Montag, L. F., Dolédec, S., Juen, L. (2017). Influence of oil palm monoculture on the taxonomic and functional composition of aquatic insect communities in eastern Brazilian Amazonia. *Ecological Indicators*, 82, 478-483.
- MackENZIE, D. I. (2005). What are the issues with Presence-Absence data for wildlife managers?. *The Journal of Wildlife Management*, 69, 849-860.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., and Hughes, M. K. (1999). Northern Hemisphere Temperatures during the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 759–762.
- Mavrodieva, A. V., Rachman, O. K., Harahap, V. B., and Shaw, R. (2019). Role of Social Media as a Soft Power Tool in Raising Public Awareness and Engagement in Addressing Climate Change. *Climate*, 7(10), 122.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.
- Meyer, A. L. S., Bentley, J., Odoulami, R. C., Pigot, A. L., Trisos, Ch. H. (2022). Risks to biodiversity from temperature overshoot pathways. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 377(1857), 20210394.
- Miller, J. (2010). Species Distribution Modeling. *Geography Compass*, 4, 490-509.
- Miller, R. L., Schmidt, G. A., Nazarenko, L. S., Tausnev, N., Bauer, S. E., Del Genio, A. D., et al. (2014). CMIP5 historical simulations (1850–2012) with GISS model E2. *Journal of Advances in Modeling the Earth System*, 6, 441–477.
- Mörner, N. A. (2015). The approaching new grand solar minimum and little ice age climate conditions. *Natural Science*, 7(11), 510.

Moudrý, V., & Šímová, P. (2012). Influence of positional accuracy, sample size and scale on modelling species distributions: a review. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(11), 2083-2095.

Moudrý, V., Cord, A. F., Gábor, L., Laurin, G. V., Barták, V., Gdulová, K., Malavasi, M., Rocchini, D., Stereńczak, K., Prošek, J., Klápště, P., and Wild, J. (2023). Vegetation structure derived from airborne laser scanning to assess species distribution and habitat suitability: The way forward. *Divers Distrib*, 29, 39-50.

Moustakis, Y., Fatichi, S., Onof, C., & Paschalis, A. (2022). Insensitivity of ecosystem productivity to predicted changes in fine-scale rainfall variability. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127, e2021JG006735.

NOAA National Centers for Environmental Information (2023). State of the Climate: Global Climate Report for 2022. Dostupné z: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>

Pecchi, M., Marchi, M., Burton, V., Giannetti, F., Moriondo, M., Bernetti, I., Bindi, M., Chirici, G. (2019). Species distribution modelling to support forest management. A literature review. *Ecological Modelling*, 411, 108817.

Pearson, R. G. (2008). Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. Synthesis, American Museum of Natural History, Dostupné z: <http://ncep.amnh.org>

Purvis, A., Hector, A. (2000). Getting the measure of biodiversity. *Nature*, 405, 212–219.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Redford, K. H., and Richter, B. D. (1999). Conservation of Biodiversity in a World of Use. *Conservation Biology*, 13, 1246-1256.

Sabater, S., Freixa, A., Jiménez, L., López-Doval, J., Pace, G., Pascoal, C., Perujo, N., Craven, D., and González-Trujillo, J. D. (2023). Extreme weather events threaten biodiversity and functions of river ecosystems: evidence from a meta-analysis. *Biol Rev*, Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/brv.12914>

Santini, L., Benítez-López, A., Maiorano, L., Čengić, M., & Huijbregts, M. A. (2021). Assessing the reliability of species distribution projections in climate change research. *Diversity and Distributions*, 27(6), 1035-1050.

Stejskal, L. (2012). Změna klimatu a její dopady: hlavní hrozba 21. století. Praha: Univerzita Karlova.

Stott, P. (2016). How climate change affects extreme weather events. *Science*, 352(6293), 1517-1518.

Šímová, I., Violle, C., Svenning, J.C., et al. (2018). Spatial patterns and climate relationships of major plant traits in the New World differ between woody and herbaceous species. *J Biogeogr*, 45, 895– 916.

Trew, B. T., & Maclean, I. M. (2021). Vulnerability of global biodiversity hotspots to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 30(4), 768-783.

Varela, S., Anderson, R. P., García-Valdés, R., & Fernández-González, F. (2014). Environmental filters reduce the effects of sampling bias and improve predictions of ecological niche models. *Ecography*, 37(11), 1084-1091.

West, A. M., Kumar, S., Brown, S. C., Stohlgren, T. J., Bromberg, J. (2016). Field validation of an invasive species Maxent model. *Ecological Informatics*, 36, 126-134.

Wiese, D., Escalante, A. A., Murphy, H., Henry, K. A., Gutierrez-Velez, V. H. (2019). Integrating environmental and neighborhood factors in MaxEnt modeling to predict species distributions: A case study of *Aedes albopictus* in southeastern Pennsylvania. *Plos One*, 14(10), e0223821.

Willis, K. J., & Bhagwat, S. A. (2009). Biodiversity and climate change. *Science*, 326(5954), 806-807.

WorldClim, © (2022). Dostupné z: <https://www.worldclim.org/>

World Economic Forum, © (2023). Global risk report 18th edition. Dostupné z: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/>

Změna klimatu 2007: Dopady změny klimatu, adaptace a zranitelnost. Příspěvek Pracovní skupiny II ke Čtvrté hodnotící zprávě Mezivládního panelu změny klimatu (IPCC). Shrnutí pro politické představitele [online]. Překlad dle verze ze 13. dubna 2007. IPCC, 2007, Dostupné z: <http://ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/czech/ar4-wg2-spm.pdf>

8 Seznam použitých zkratek

AOPK	Asociace ochrany přírody a krajiny
AUC	Area under curve
BC	BioClim
ČR	Česká republika
GAM	General aditiv model
GLM	General linear model
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LiDAR	Light Detection And Ranging
NO _x	různé formy oxidů dusíku
PCC	Percent correctly classified
PPP	Proportion of predicted presence correctly predicted
RF	RandomForest
ROC	Receiver-operating characteristic
ROR	Relative occurrence rate
SDM	Species distribution models
SJTSK	System jednotné trigonometrické sítě katastrální
TSS	True skill statistic
VIF	Variační inflační faktor
WEF	World Economic Forum

9 Seznam tabulek

Tab.1 Otevřené zdroje dat	8
Tab.2 Přehled vybraných modelovacích metod	10

10 Seznam obrázků

Obr.1 Příklad 2-rozměrné ekologické niky	6
Obr.2 Obecné schéma fungování SDM	7
Obr.3 Modelování struktury vegetace a topografie pomocí leteckého lidarů	9
Obr.4 Obecné schéma confusion matrix	12
Obr.5 Schéma metody Cross-validation	16
Obr.6 Změny rozlohy habitatů	19
Obr.7 Geografická distribuce Volavky vlasaté	20
Obr.8 Geografická distribuce Jespáka písečného	21
Obr.9 Geografická distribuce Ústřičníka velkého	22
Obr.10 Geografická distribuce Rybáka bělokřídleho	23
Obr.11 Geografická distribuce Budníčka zeleného	24

11 Přílohy

Skript pro tvorbu SDM v R.

```
#instalace packages jen poprvé pro stažení knihoven -----  
installAll() #instaluje všechny packages
```

```
#načtení knihoven -----  
library(sp)  
library(sf)  
library(sdm)  
library(raster)  
library(rgdal)  
library(usdm)  
library('RCzechia')  
library(maptools)  
library(ggplot2)  
library(dplyr)  
library(recipes)  
library(flexsdm)  
library(sqldf)  
library(maps)  
library(testthat)  
library(roxygen2)  
library(RStoolbox)  
library(cowplot)
```

```
#nastavení cesty pro uložení -----  
getwd()  
setwd("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka")
```

```
#nahrání vstupních dat -----  
#výskytová data  
ptaci_5514 <- read.csv("~/bakalářka/ndop-5514-birds.csv")  
druhy_ptaci_5514 <- split(ptaci_5514,ptaci_5514$species)  
#klimatická data  
klima_curr <- raster::getData("worldclim",var = "bio", res =  
0.5, lon = 15, lat = 50, download = F)  
klima_fut <- raster::getData("CMIP5", var='bio',  
res=0.5,lon=15, lat=50, rcp=85, model='NO', year=50,  
download=F)
```

```
#úprava klimatických dat -----  
#přibližné oříznutí a transformace souřadnicového systému  
cca_lonlat_ext <- c(12,19,48,51.5)  
klima_curr_5514 <- crop(klima_curr,cca_lonlat_ext)  
klima_curr_5514 <- projectRaster(klima_curr_5514,crs = 5514)  
  
klima_fut_5514 <- crop(klima_fut,cca_lonlat_ext)  
klima_fut_5514 <- projectRaster(klima_fut_5514, crs = 5514)  
  
#sjednocení jmen  
names(klima_curr_5514)  
names(klima_fut_5514)
```

```
names(klima_fut_5514) <- names(klima_curr)
```

```
# CZE mask - transformace souřadnicového systému
```

```
CZE <- republika("low")
```

```
CZE <- st_transform(CZE, 5514)
```

```
#oříznutí na oblast ČR
```

```
klima_curr_5514 <- mask(klima_curr_5514, CZE)
```

```
klima_fut_5514 <- mask(klima_fut_5514, CZE)
```

```
#vif analýza -----
```

```
vif(klima_curr_5514)
```

```
v <- vifstep(klima_curr_5514);v
```

```
v
```

```
v_klima_curr_5514 <- exclude(klima_curr_5514, v)
```

```
v_klima_fut_5514 <- exclude(klima_fut_5514, v)
```

```
#data konkrétního druhu -----
```

```
data <- druhy_ptaci_5514$'Phylloscopus trochiloides'
```

```
head(data)
```

```
attach(data)
```

```
class(data)
```

```
dim(data)
```

```
#environmentální filtr-----
```

```
## Funkce filtru
```

```
envSample<- function (coord, filters, res, do.plot=TRUE){
```

```
  n<- length (filters)
```

```
  pot_points<- list ()
```

```
  for (i in 1:n){
```

```
    k<- filters [[i]] [!is.na(filters[[i])]
```

```
    ext1<- range (k)
```

```
    ext1 [1]<- ext1[1]- 1
```

```
    x<- seq(ext1[1],ext1[2], by=res[[i])
```

```
    pot_points[[i]]<- x
```

```
  }
```

```
  pot_p<- expand.grid(pot_points)
```

```
  ends<- NULL
```

```
  for (i in 1:n){
```

```
    fin<- pot_p [,i] + res[[i]]
```

```
    ends<- cbind (ends, fin)
```

```
  }
```

```
  pot_pp<- data.frame (pot_p, ends)
```

```
  pot_pp<- data.frame (pot_pp, groupID=c(1:nrow (pot_pp)))
```

```
  rows<- length (filters[[1]])
```

```
  filter<- data.frame(matrix(unlist(filters), nrow=rows))
```

```
  real_p<- data.frame (coord, filter)
```

```
  names_real<- c("lon", "lat")
```

```
  names_pot_st<- NULL
```

```
  names_pot_end<- NULL
```

```

sql1<- NULL
for (i in 1:n){
  names_real<- c(names_real, paste ("filter", i, sep=""))
  names_pot_st<- c(names_pot_st, paste ("start_f", i,
sep=""))
  names_pot_end<- c(names_pot_end, paste ("end_f", i,
sep=""))
  sql1<- paste (sql1, paste ("real_p.filter", i, sep=""),
sep=", ")
}

names (real_p)<- names_real
names (pot_pp)<- c(names_pot_st, names_pot_end, "groupID")

conditions<- paste ("(real_p.filter", 1, "<= pot_pp.end_f",
1,") and (real_p.filter", 1, "> pot_pp.start_f", 1, ")")",
sep="")
for (i in 2:n){
  conditions<- paste (conditions,
paste ("(real_p.filter", i, "<=
pot_pp.end_f", i,") and (real_p.filter", i, ">
pot_pp.start_f", i, ")")", sep=""),
sep="and")
}

selection_NA<- sqldf(paste ("select real_p.lon, real_p.lat,
pot_pp.groupID",
sql1, "from pot_pp left join
real_p on", conditions, sep=" "))

selection<- selection_NA [complete.cases(selection_NA),]

final_points<- selection[!duplicated(selection$groupID), ]
coord_filter<- data.frame (final_points$lon,
final_points$lat)
names (coord_filter)<- c("lon", "lat")

if (do.plot==TRUE){
  par (mfrow=c(1,2), mar=c(4,4,0,0.5))
  plot (filters[[1]], filters[[2]], pch=19,
col="grey50", xlab="Filter 1", ylab="Filter 2")
  points (final_points$filter1, final_points$filter2,
pch=19, col="red")
  plot (coord, pch=19, col="grey50")
  map(add=T)
  points (coord_filter, pch=19, col="red2")
}
coord_filter
}

```

Filtrování výskytů

```

coord <- data[,c(3,4)]
rownames(coord) <- NULL

```

```

head(coord)
variables <-list.files (pattern=".bil")
worldclim <-stack (v_klima_curr_5514)
names(worldclim) <-
c('bio3','bio4','bio6','bio9','bio13','bio15')
data <- raster::extract(worldclim, coord)
data <- as.data.frame (data)
filter_occ <- envSample (coord, filters=
list(data$bio3,data$bio15),res=list(.5,1.5), do.plot=TRUE)
data_xy<-as.data.frame(filter_occ)
data_xy$occ <- '1'
coordinates(data_xy) <- c('lon','lat')
class(data_xy)
plot(data_xy)

```

```

#SDM ----
data_sdm <- sdm::sdmData(occ~., data_xy,predictors =
v_klima_curr_5514,
                        bg= list(method='gRandom',n=
10000,remove=T))
data_sdm
class(data_sdm)

data_model <- sdm(occ~., data_sdm, methods =
'maxent',replications= 'cv',cv.folds=5,

parallelSetting=list(ncore=2,method='parallel'),mean(T))
data_model

gui(data_model)

```

```

#predikce pravděpodobnosti výskytu ----
data_p_curr <- predict(data_model,v_klima_curr_5514, mean= T)
data_p_curr
names(data_p_curr)
plot(data_p_curr)
setwd("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka/TIFF")
writeRaster(data_p_curr,filename=file.path("_soucastna_vhodnos
t.tif"),format="GTiff",overwrite=TRUE)

data_p_fut <-
predict(data_model,v_klima_fut_5514,filename='data_p_fut',mean=
T)
data_p_fut
names(data_p_fut)
plot(data_p_fut)
writeRaster(data_p_fut,filename=file.path("_budouci_vhodnost.t
if"),format="GTiff",overwrite=TRUE)

```

```

#predikce prezence a absence----
data_pa_curr <- raster(data_p_curr)
data_pa_curr[] <- ifelse(data_p_curr[]>=0.8,1,0)
plot(data_pa_curr)
writeRaster(data_pa_curr,filename=file.path("_soucastna_pa.tif
"),format="GTiff",overwrite=TRUE)

```

```

data_pa_fut <- raster(data_p_curr)
data_pa_fut[] <- ifelse(data_p_fut[]>=0.8,1,0)
plot(data_pa_fut)
writeRaster(data_pa_fut,filename=file.path("_budouci_pa.tif"),
format="GTiff",overwrite=TRUE)

```

#rozdíl výskytu----

```

data_chp <- data_pa_fut - data_pa_curr
plot(data_chp, col=c('red','grey','blue'))
writeRaster(data_chp,filename=file.path("_rozdil_vyskytu.tif"),
,format="GTiff",overwrite=TRUE)

```

#grafický výstup-----

```
options(scipen = 999)
```

Načtení dat

```

pres <-
raster::raster("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka/TIFF/phyлло_s
oucastna_vhodnost.tif")
prespa <-
raster::raster("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka/TIFF/phyлло_s
oucastna_pa.tif")
fut <-
raster::raster("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka/TIFF/phyлло_b
udouci_vhodnost.tif")
futpa <-
raster::raster("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka/TIFF/phyлло_b
udouci_pa.tif")
diff <-
raster::raster("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka/TIFF/phyлло_r
ozdil_vyskytu.tif")

```

transformace rastru na dataframe

```

pres.df <- data.frame(raster::rasterToPoints(pres))
prespa.df <- data.frame(raster::rasterToPoints(prespa))
fut.df <- data.frame(raster::rasterToPoints(fut))
futpa.df <- data.frame(raster::rasterToPoints(futpa))
diff.df <- data.frame(raster::rasterToPoints(diff))

```

Změna jmen sloupců

```

colnames(pres.df) <- c("Longitude", "Latitude", "MAP")
colnames(prespa.df) <- c("Longitude", "Latitude", "MAP")
colnames(fut.df) <- c("Longitude", "Latitude", "MAP")
colnames(futpa.df) <- c("Longitude", "Latitude", "MAP")
colnames(diff.df) <- c("Longitude", "Latitude", "MAP")

```

Vhodná barevná paleta (i pro barvoslepé)

```

cl <- colorRampPalette(c("#3E49BB", "#3498DB", "yellow",
"orange", "red", "darkred"))

```

Graf současné pravděpodobnosti výskytu

```

p.pres <- ggplot(pres.df, aes(y=Latitude, x=Longitude)) +
geom_raster(aes(fill=MAP)) +

```

```

  scale_fill_gradientn(colours = cl(200),
na.value="transparent", breaks = c(.2, .8), labels =
c("NÍZKÁ", "VYSOKÁ"))+
  theme_void()+
  labs(subtitle = 'SOUČASNÁ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU', title =
"")+ # Plot title
  theme(plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, face =
"bold.italic", size = 10),
        legend.title = element_blank(),
        legend.position = "bottom",
        legend.box = "horizontal",
        legend.key.width = unit(1, 'cm'),
        legend.key.height = unit(.3, 'cm'),
        legend.text = element_text(size=9),
        plot.caption = element_text(size = 8, face =
"bold.italic", hjust = 1))

```

Graf budoucí pravděpodobnosti výskytu

```

p.fut <- ggplot(fut.df, aes(y=Latitude, x=Longitude)) +
  geom_raster(aes(fill=MAP)) +
  scale_fill_gradientn(colours = cl(200),
na.value="transparent", breaks = c(.2, .8), labels =
c("NÍZKÁ", "VYSOKÁ"))+
  theme_void()+
  labs(subtitle = 'BUDOUCÍ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU', title =
"")+
  theme(plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, face =
"bold.italic", size = 10),
        legend.title = element_blank(),
        legend.position = "bottom",
        legend.box = "horizontal",
        legend.key.width = unit(1, 'cm'),
        legend.key.height = unit(.3, 'cm'),
        legend.text = element_text(size=9),
        plot.caption = element_text(size = 8, face =
"bold.italic", hjust = 1))

```

Graf současné pa

```

p.prespa <- ggplot(prespa.df, aes(y=Latitude, x=Longitude)) +
  geom_raster(aes(fill=MAP)) +
  scale_fill_gradientn(colours = c("grey70", "#d95f02"),
na.value="transparent", breaks = c(1, -1), labels = c("VHODNÉ
HABITATY", "NA"))+
  guides(fill = guide_legend())+
  theme_void()+
  labs(subtitle = "SOUČASNÉ VHODNÉ HABITATY", title = "")+
  theme(plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, face =
"bold.italic", size = 10),
        legend.title = element_blank(),
        legend.position = "bottom",
        legend.box = "horizontal",
        legend.key.size = unit(.4, 'cm'),
        legend.text = element_text(size=9),
        plot.caption = element_text(size = 8, face =
"bold.italic", hjust = 1))

```



```

# Graf budoucí pa
p.futpa <- ggplot(futpa.df, aes(y=Latitude, x=Longitude)) +
  geom_raster(aes(fill=MAP)) +
  scale_fill_gradientn(colours = c("grey70", "#d95f02"),
na.value="transparent", breaks = c(1, -1), labels = c("VHODNÉ
HABITATY", "NA"))+
  guides(fill = guide_legend())+
  theme_void()+
  labs(subtitle = "BUDOUCÍ VHODNÉ HABITATY", title = "")+
  theme(plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, face =
"bold.italic", size = 10),
        legend.title = element_blank(),
        legend.position = "bottom",
        legend.box = "horizontal",
        legend.key.size = unit(.4, 'cm'),
        legend.text = element_text(size=9),
        plot.caption = element_text(size = 8, face =
"bold.italic", hjust = 1))

```

```

# Graf změny habitatů
p.diff <- ggplot(diff.df, aes(y=Latitude, x=Longitude)) +
  geom_raster(aes(fill=MAP)) +
  scale_fill_gradientn(colours = c("#b2182b", "grey70",
"#2166ac"), na.value="transparent", breaks = c(1, -1), labels
= c("NĀRŮST", "POKLES"))+
  guides(fill = guide_legend())+
  theme_void()+
  labs(subtitle = "ZMĚNA V ROZLOZE HABITATŮ", title = "")+
  theme(plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, face =
"bold.italic", size = 10),
        legend.title = element_blank(),
        legend.position = "bottom",
        legend.box = "horizontal",
        legend.key.size = unit(.4, 'cm'),
        legend.text = element_text(size=9),
        plot.caption = element_text(size = 8, face =
"bold.italic", hjust = 1))

```

Sjednocení grafů do obrázku, přidání nadpisu

```

p.grid <- plot_grid(p.pres,p.prespa,p.fut,p.futpa, p.diff,
nrow = 3)

ggdraw(p.grid) +
  draw_label(" Budníček zelený (Phylloscopus trochiloides) ",
x = 0.5, y = .98, fontface = "bold.italic", size = 15)

```

Uložení výstupu

```

ggsave("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka/jachym_phyllo1.png",
width = 16, height = 12 , units = "cm", dpi = 300)

```

#poměr rozdílů v rozlohách habitatů -----

#současný stav

```

real <- dplyr::filter(prespa.df, MAP == "1")
phyllo_real <- nrow(real)

```

```

# pokles současných habitatů v %
droap <- dplyr::filter(diff.df, MAP == "-1")
phyllo_droap<-(nrow(droap)*100)/nrow(real)
# nárůst budoucích habitatů v %
inc <- dplyr::filter(diff.df, MAP == "1")
phyllo_inc <- (nrow(inc)*100)/nrow(real)

#Grafický výstup ----
options(scipen = 999)

#příprava dataframe
names = c('Vrána sp.','Ústřičník velký','Rybák
bělokřídlý','Pěnice sp.','Budníček zelený')
all_inc <-
c(corvus_inc,haematopus_inc,chlidonias_inc,sylvia_inc,phyllo_i
nc)
all_drop <-
c(corvus_droap,haematopus_droap,chlidonias_droap,sylvia_droap,
phyllo_droap)
zmena <- data.frame(names,all_inc,all_drop)

#boxplot nárůst
dif_inc <- ggplot(zmena, aes(x=names,y=all_inc),color='blue')+
geom_boxplot(color="#2166ac")+
labs(subtitle = "Nárůst současných habitatů",x= NULL,y="nárůst
v %" ,)+
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust =
.5,hjust = 1),plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, face =
"bold.italic", size = 10))

dif_inc

#boxplot úbytek
dif_drop <-
ggplot(zmena,aes(x=names,y=all_drop))+geom_boxplot(color="#b21
82b")+
  labs(subtitle = "Úbytek současných habitatů",x=
NULL,y="úbytek v %" )+
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust =
.5,hjust = 1),plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, face =
"bold.italic", size = 10))

dif_drop

#spojení grafů
dif_all <- plot_grid(dif_inc,dif_drop,nrow = 1)
ggdraw(dif_all) +
  draw_label("Změna habitatů", x = 0.5, y = .98, fontface =
"bold.italic", size = 15,)

# uložení výstupu
ggsave("C:/Users/Admin/Desktop/Bakalářka/jachym_box.png",
width = 16, height = 12 , units = "cm", dpi = 300)

```