

# Mikroklimatická mapa stanovišť Průhonického parku

## Průvodní zpráva

---

### Nimap – interaktivní specializovaná mapa s odborným obsahem

**Název projektu:** Průhonický park a škola malířsko-krajinářské kompozice, obdivovaný a odmítaný vzor pro krajinářskou tvorbu 20. století

**Identifikační kód projektu:** DH23P03OVV026

**Program NAKI III – program na podporu aplikovaného výzkumu v oblasti národní a kulturní identity na léta 2023 až 2030**

**Řešitel projektu:** Botanický ústav AV ČR, v. v. i., Zámek 1, Průhonice, 25243, Česká republika

**Vydáno:** 2025



## Informace o autorském týmu:

RNDr. Josef Brůna, Ph.D.

Mgr. Tereza Klinerová

Ing. Vojtěch Kalčík

Mgr. Zdeňka Konopová

## Online interaktivní rozhraní

ArcGIS storymap: <https://arcg.is/1zqTKK0> včetně všech náležitostí Nimap



## Abstrakt

Na základě měření teplot na mikroklimatických stanicích v Průhonickém parku byly pomocí geostatistických metod vytvořeny mapy biologicky relevantních mikroklimatických proměnných celého parku v rastru s rozlišením 5 m.

## Poděkování

Interaktivní specializovaná mapa s odborným obsahem „Mikroklimatická mapa stanovišť Průhonického parku“ vznikla jako jeden z výstupů výzkumného projektu „*Průhonický park a škola malířsko-krajinářské kompozice, obdivovaný a odmítaný vzor pro krajinářskou tvorbu 20. století*“ (identifikační kód projektu DH23P03OVV026). Projekt je financován prostřednictvím „Program NAKI III – Program na podporu aplikovaného výzkumu v oblasti národní a kulturní identity na léta 2023 až 2030“ Ministerstva kultury.



## Obsah

|                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I) Cíl výsledku, interaktivní specializovaná mapa s odborným obsahem.....                                                                                                                              | 4  |
| II) Vlastní popis výsledku .....                                                                                                                                                                       | 5  |
| Úvod .....                                                                                                                                                                                             | 5  |
| Metodika .....                                                                                                                                                                                         | 5  |
| Sběr a zpracování vstupních dat.....                                                                                                                                                                   | 6  |
| Metodika modelování.....                                                                                                                                                                               | 9  |
| Tvorba vrstev a jejich zpracování.....                                                                                                                                                                 | 10 |
| Výsledky.....                                                                                                                                                                                          | 11 |
| Publikace vrstev.....                                                                                                                                                                                  | 11 |
| Specifikace výzkumem zjištěných poznatků.....                                                                                                                                                          | 12 |
| Technické parametry .....                                                                                                                                                                              | 12 |
| Online interaktivní rozhraní.....                                                                                                                                                                      | 13 |
| Jednotlivé mapy ve formátu TIFF (S-JTSK / Krovak East North, EPSG: 5514) .....                                                                                                                         | 13 |
| Jednotlivé mapy ve formátu WMTS (WGS 1984 Web Mercator, EPSG:3857) .....                                                                                                                               | 13 |
| III) Srovnání „novosti postupů“ oproti původní mapě, pokud existuje, nebo jejich zdůvodnění, pokud se bude jednat o novou originální interaktivní mapu, a jejich srovnání s postupy v zahraničí, ..... | 14 |
| IV) Návrh využití výsledku (definování subjektů, které by měly být uživateli výsledků) .....                                                                                                           | 16 |
| V) Výčet konkrétních subjektů/skupin uživatelů, pro které je mapa určena .....                                                                                                                         | 16 |
| VI) Seznam publikací, které přímo předcházely výsledku interaktivní specializovaná mapa s odborným obsahem a byly publikovány (pokud existují), případně výstupy z originální práce.....               | 17 |
| VII) Číslovaný seznam příložených map.....                                                                                                                                                             | 17 |
| VIII) Seznam použité literatury .....                                                                                                                                                                  | 26 |

## I) Cíl výsledku, interaktivní specializovaná mapa s odborným obsahem

Výsledek Nimap je předkládán v souladu s cíli výzkumného projektu a je plně v souladu s plánovanými výsledky projektu tak, jak byly navrženy v přihlášce.

Cílem bylo vytvořit mapy mikroklimatu Průhonického parku, které pokrývají jak lesní porosty, tak bezlesí. Variabilita jednotlivých proměnných ukazuje, jak mikroklimaticky heterogenní je území parku. To je nejlépe vidět na příkladu průměrné roční teploty 15 cm nad zemí. V parku je tento gradient od 9 do 12 °C, což odpovídá zhruba 4° zeměpisné šířky neboli vzdálenosti 440–480 km severo-jihním směrem. Teplotně zde najdeme lokality odpovídající oblastem od středních Čech až po jih Slovenska.

## II) Vlastní popis výsledku

Předkládaná specializovaná mapa s odborným obsahem je tvořena souborem osmi map, které zobrazují jednotlivé mikroklimatické proměnné na území Průhonického parku. Referenční období pro klimatické měření je 22. 4. 2024 – 21. 4. 2025. Při aplikaci výsledků na jiné časové období lze předpokládat, že relativní prostorové vztahy zůstanou zachovány (s výjimkou porostů, kde došlo k výrazné změně vegetačního krytu), zatímco absolutní hodnoty se mohou lišit podle vývoje makroklimatu.

Online verze mapy umožňuje dotazování na mikroklimatické charakteristiky v jednotlivých pixelech s délkou hrany 5 m. Díky použití standardů WMTS (Web Map Tile Service) a WFS (Web Feature Service) lze data snadno připojit i do dalších geografických informačních systémů. Níže uvádíme popis vstupních dat, metodiku zpracování a tvorby map a jednotlivé výsledky.

### Úvod

Přesné klimatické mapy představují nezbytný nástroj pro hodnocení stavu životního prostředí, pro účinné hospodaření, modelování ekosystémových procesů i pro ochranu biodiverzity. Běžně dostupné klimatické rastry založené na datech z meteorologických stanic však nedokážou zachytit mikroklimatické poměry v prostorových měřítkách, která jsou ekologicky relevantní (Scherrer et al., 2011; Macek et al., 2019). Současně nezohledňují specifické podmínky v lesním podrostu (Geiger et al., 2009).

Mikroklima je výsledkem komplexní interakce lokální variability reliéfu a struktury a složení korunového patra (Grimmond et al., 2000; Frey et al., 2016; Stickley & Fraterrigo, 2021). Tato prostorově strukturovaná mozaika není zachycena v hrubozrnných klimatických rastrech odvozených z dat meteorologických stanic (Haesen et al., 2021; Stickley & Fraterrigo, 2021). Stromové či keřové patro přitom může mikroklimatické podmínky podrostu od makroklimatických charakteristik výrazně odlišovat (von Arx et al., 2012; Kašpar et al., 2021). Nejvíce odlišnými proměnnými jsou navíc ekologicky nejvýznamnější minimální a maximální teploty (Zellweger et al., 2019). Přestože data z lokálních meteorologických stanic mohou zpřesnit predikci mikroklimatické variability na základě globálních datových sad (Zanchi et al., 2023), nedokáží vystihnout vliv prostorové heterogenity lesní struktury.

### Metodika

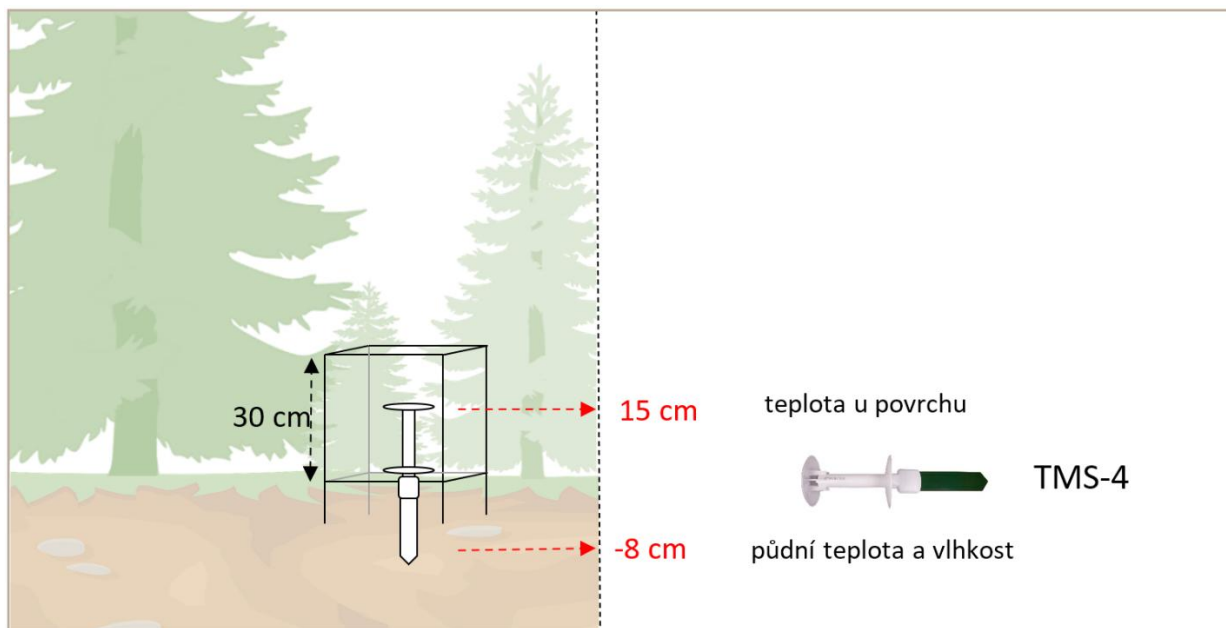
K řešení tohoto nesouladu mezi klimatickými podmínkami, které skutečně zažívají organismy (mikroklima), a interpolovanými hrubozrnnými klimatickými proměnnými (makroklima), lze využít data ze sítí mikroklimatických dataloggerů (Lundquist & Lott, 2008; Fridley, 2009; Ashcroft et al., 2014; Aalto et al., 2022) v kombinaci s prostorově explicitními údaji o reliéfu povrchu a lesní struktuře. Takto lze konstruovat vysokorozlišovací mikroklimatické rastry (Fridley, 2009; Greiser et al., 2018; Macek et al., 2019), které mají potenciál výrazně posunout ekologický výzkum (Greiser et al., 2020), zpřesnit modely rozšíření druhů (Stark

et al., 2022; Haesen et al., 2023b) a současně poskytnout praktický podklad pro hospodaření a ochranu přírody (Hylander et al., 2022).

## Sběr a zpracování vstupních dat

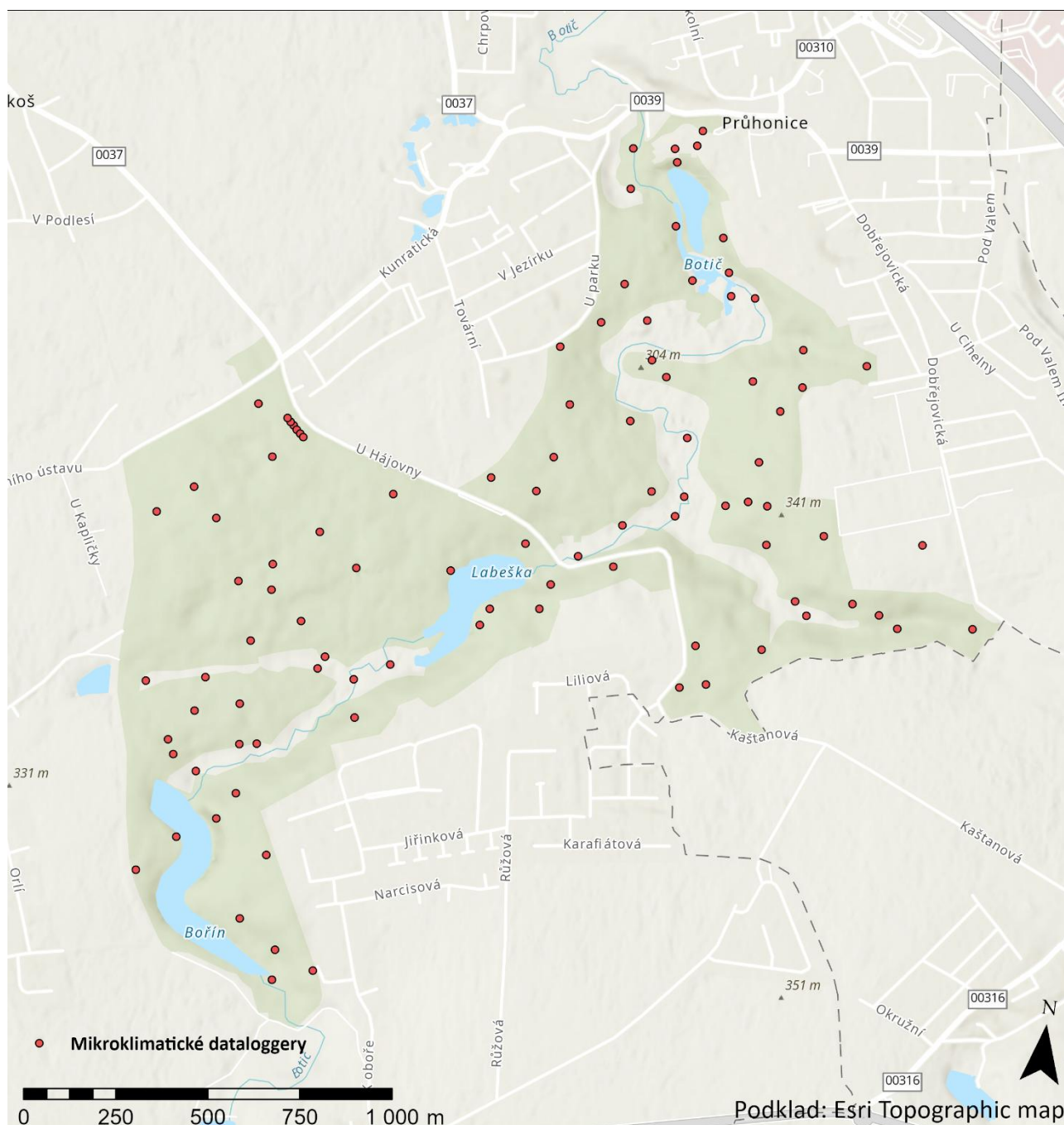
### Mikroklimatická data

Pro účely tvorby mikroklimatických map Průhonického parku byla založena vlastní síť čítající 100 lokalit osazených autonomními dataloggery Tomst TMS-4 (Wild et al., 2019), které zaznamenávaly vzdušnou teplotu ve výšce 15 cm nad půdou, půdní teplotu v hloubce 8 cm a půdní vlhkost ve svrchní vrstvě půdy (0-15 cm; Obrázek 1).



Obrázek 1 Schéma osazení dataloggeru na lokalitě

Jednotlivé lokality byly vybrány na základě historických měření (20 lokalit) a dále tak, aby byly pokryty hlavní gradienty prostředí se známým vlivem na mikroklima – nadmořská výška, svažítost, index tepelného požitku stanoviště, vzdálenost k vodním tokům, korunový zápoj. Jednotlivé gradienty prostředí jsme pokryli podle jejich zastoupení na území Průhonického parku – časté typy byly tedy osazené častěji, abychom zachovali reprezentativnost. Zvláštní důraz byl kladen na osazení extrémních hodnot, aby nedocházelo k extrapolaci měření mimo rozsah pokrytý měřeními. Finální rozložení je vidět na mapě (Obrázek 2). Podařilo se získat platná data z 98 dataloggerů, především díky pravidelné kontrole a výměně poškozených nebo porouchaných dataloggerů.



Obrázek 2 Mapa lokalit v Průhonickém parku

Data z jednotlivých loggerů byla zpracována pomocí balíčku myClim (Man et al., 2023). Pro analýzy byl zvolen časový úsek 22. 04. 2024 – 21. 04. 2025, tj. o délce jednoho roku, pro který byla k dispozici úplná měření. Z naměřených hodnot v 15minutovém intervalu byly vypočteny proměnné charakterizující mikroklima (Tab. 1), které byly následně použity jako vstupní data pro modelování. Metodiku zpracování dat detailně popisují Brůna et al. (2024). Teplotu vzduchu nad zemí jsme charakterizovali pomocí průměrné a maximální teploty (95. percentil denních maxim) a minimální teploty (5. percentil denních minim) (Ashcroft et al., 2014; Körner et al., 2018). Dále jsme odvodili sumu efektivních teplot GDD5 (Growing Degree Days), definovanou jako integrální hodnotu všech teplot převyšujících základní teplotu 5 °C dělenou počtem měření za den (Man et al., 2023) a také sumu mrazových teplot FDD0 (Freezing Degree Days), definovanou opět jako integrální hodnotu všech teplot menších než 0 °C, dělenou počtem měření za den (Man et al., 2023).

Půdní mikroklima jsme charakterizovali pomocí průměrné roční teploty a objemové vlhkosti půdy vypočtené z hodnot získaných dataloggeru TMS-4 s využitím výchozích nastavení zrnitosti půdy (Man et al., 2023).

*Tabulka 1 Přehled mikroklimatických proměnných*

| Název                                                 | popis                                                       | zkratka               | jednotky                       |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Průměrná teplota vzduchu při zemi                     | aritmetický průměr všech hodnot                             | T.air_15_cm.mean      | °C                             |
| Minimální teplota vzduchu při zemi<br>(5. percentil)  | 5. percentil denních minim                                  | T.air_15_cm.min5p     | °C                             |
| Maximální teplota vzduchu při zemi<br>(95. percentil) | 95. percentil denních maxim                                 | T.air_15_cm.max95p    | °C                             |
| Průměrný denní rozsah teplot vzduchu při zemi         | průměrný rozdíl denních minim a maxim                       | T.air_15_cm.drang     | °C                             |
| Suma denních teplot >5 °C (15 cm)                     | efektivní suma teplot nad 5 °C,<br>vypočtená z 15min měření | T.air_15_cm.GDD5      | °C·d                           |
| Suma denních teplot < 0 °C (15 cm)                    | efektivní suma teplot pod 0 °C,<br>vypočtená z 15min měření | T.air_15_cm.FDD0      | °C·d                           |
| Průměrná teplota půdy                                 | aritmetický průměr všech hodnot                             | T.soil_8_cm.mean      | °C                             |
| Průměrná objemová vlhkost půdy                        | aritmetický průměr všech hodnot                             | VWC.soil_0_15_cm.mean | m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |

## Topografie a vegetace

Topografie a vegetační kryt mají rozhodující význam pro mikroklima na stanovišti. Pro účely prostorové predikce mikroklimatu jsme odvodili sadu topografických proměnných z digitálního modelu terénu (DMR 5G od ČÚZK), který byl odvozen z laserového skenování. Model terénu byl převeden na rozlišení 5 m pomocí B-spline interpolace v programu SAGA GIS 7.9.0 (Conrad et al., 2015).

Topografické proměnné s předpokládanou vazbou na mikroklima byly vybrány na základě rešerše literatury (De Frenne et al., 2019; Geiger et al., 2009; Kovács et al., 2017; Leempoel et al., 2015; Macek et al., 2019; Zellweger et al., 2015). Přehled základních a odvozených topografických proměnných uvádí Tabulka 2. Proměnné byly vypočteny v programu SAGA GIS 7.9.0 (Conrad et al., 2015), ArcGIS Pro (Esri Inc. 2025) a R (R Core Team, 2020). Topografické proměnné, které neměly signifikantní vliv na žádnou mikroklimatickou proměnnou, nejsou uvedeny.

Kromě topografie hraje důležitou roli i vegetační kryt a vodní plochy. Tyto charakteristiky jsme popsali pomocí několika proměnných odvozených z dostupných dat (Tabulka 3). Dále byly využity detailní mapy vodních ploch (interní materiál správy Průhonického parku) pro zohlednění vlivu vody na utváření mikroklimatu. Z těchto map jsme spočítali vzdálenost dataloggerů k nejbližší vodní ploše a také podíl vodních ploch v kruhu o poloměru 10, 25 a 50 m od dataloggeru. Pro charakterizaci vegetace jsme využili mračno bodů, které vzniklo metodou „structure from motion“, výsledek snímkování dronem s průměrnou hustotou 56 bodů na m<sup>2</sup>. Z bodového mračna byla vypočtena výška porostů a strukturální charakteristiky vegetačního krytu. Též jsme využili výšku vegetace vypočtenou z volně dostupných dat ČÚZK – digitálního modelu povrchu první generace (DMP 1G) a digitálního modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G). V obou těchto produktech jsme nastavili výšku

0 v oblastech se zápornými hodnotami. Z této vrstvy jsme spočítali též podíl porostů s výškou nad 5 m v okolí 10, 25 a 50 m od dataloggeru.

*Tabulka 2 Seznam použitých topografických proměnných*

| zkratka               | popis                                                                                                                                       |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>dah</b>            | Index tepelného požitku stanoviště (diurnal anisotropic heating, algoritmus SAGA GIS)                                                       |
| <b>dem_gauss</b>      | Gaussovsky vyhlazená nadmořská výška (10 m) - digitální model reliéfu (DMR 5G) od ČÚZK, (výpočet v R)                                       |
| <b>sagawi</b>         | Topografický vlhkostní index SAGA (algoritmus SAGA GIS)                                                                                     |
| <b>tpi</b>            | Index relativní topografické pozice pro 25 m okolí (algoritmus SAGA GIS)                                                                    |
| <b>vert_dist_chan</b> | Vertikální vzdálenost od vodních toků (algoritmus SAGA GIS)                                                                                 |
| <b>lon, lat</b>       | Prostorová složka zohledňující gradient na základě zeměpisné šířky a délky, který v místě odrazí vliv tepelného ostrovu Prahy (výpočet v R) |

*Tabulka 3 Seznam vegetačních a hydrologických proměnných*

| zkratka                        | popis                                                                                                                                                             |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>dist_water_all</b>          | Euklidovská vzdálenost k vodním tokům a plochám (algoritmus ArcGIS Pro)                                                                                           |
| <b>height_average_max_void</b> | Výška porostu vypočtena s využitím dat ze snímkování dronem (funkce LAS to Raster, ArcGIS Pro)                                                                    |
| <b>height_cuzk</b>             | Výška porostu vypočtená jako rozdíl digitálního modelu povrchu (DMP 1G) a digitálního modelu reliéfu (DMR 5G) od ČÚZK, (výpočet v Raster Calculatoru, ArcGIS Pro) |
| <b>height_cuzk_5m_10m</b>      | Podíl porostů s výškou nad 5 m v kruhu o průměru 10 m, zdrojem výšek je height_cuzk (výpočet v R)                                                                 |
| <b>height_cuzk_5m_25m</b>      | Podíl porostů s výškou nad 5 m v kruhu o průměru 25 m, zdrojem výšek je height_cuzk (výpočet v R)                                                                 |
| <b>voda01_prop_25m</b>         | Podíl vodních ploch v kruhu s poloměrem 25 m (výpočet v R)                                                                                                        |

## Metodika modelování

Modelování vychází z postupu, který vytvořil Macek, popsáném v Brůna et al. (2025). Prostorový model (mapa) mikroklimatu byl odvozen pomocí pokročilých regresních modelů – zobecněných aditivních modelů (GAM) s automatickým výběrem proměnných a jejich parametrů metodami strojového učení (tzv. “gradient boosting”) v programovém prostředí R, verze 4.4.1 (R Core Team, 2020) s využitím programových balíčků *geoGAM* (Nussbaum et al., 2017), *mgcv* (Wood, 2017), a *mboost* (Hothorn et al., 2020). Princip metody spočívá v modelování nelineárních vztahů mezi prediktory (topografické a vegetační proměnné) a závislou proměnnou (mikroklima) pomocí hladkých členů (v tomto případě P-spline), které optimalizují komplexnost

hladkého členu tak, aby dosáhly nejlepší predikční schopnosti (minimalizovaly střední odchylku predikovaných hodnot). Kromě topografických a vegetačních proměnných pracoval model také s prostorovým tenzorem založeným na geografických souřadnicích. V případě území velikosti Průhonického parku simuluje tato proměnná spíše vliv tepelného ostrova Prahy než kontinentální gradienty. Kromě přímého vlivu jednotlivých proměnných byly testovány i veškeré párové interakce proměnných, čímž se postup odlišuje od původního modelu Macka (Brůna et al., 2025).

Pro finální model byl vypočten adjustovaný koeficient determinace ( $R^2_{adj}$ ). Finální model byl následně validován pomocí desetinásobné křížové validace, kterou byl získán odhad střední kvadratické chyby predikce RMSE (Root-Mean-Square Error). Byla též provedena kontrola průběhu parciálních regresních vztahů – tedy souladu mezi očekávaným vztahem na základě fyzikálních principů a empiricky odvozeným vztahem a jejich chování v případě extrapolace. Pro všechny predikce bylo ověřeno, že nedochází k extrapolaci mimo rozsah pokrytý vstupními daty.

Tabulka 4 Tabulka signifikantních proměnných v jednotlivých modelech a kvalitativní ukazatele modelu

| Modelovaná proměnná   | Kvalita modelu |        |                         |                      |             |                 |                         |                      |          |                    |                    |                      |                                         |                    |       |
|-----------------------|----------------|--------|-------------------------|----------------------|-------------|-----------------|-------------------------|----------------------|----------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------------|--------------------|-------|
|                       | dah            | sagawi | height_average_max_void | height_cuzk * sagawi | dem_gauss * | voda01_prop_25m | dist_water_all * sagawi | tpi * vert_dist_chan | sagawi * | height_cuzk_5m_10m | height_cuzk_5m_25m | dah * vert_dist_chan | Spatial Tensor<br>longitude * latitude) | R <sup>2</sup> adj | RMSE  |
| T.air_15_cm.mean      | 1.00           | 4.25   |                         |                      |             |                 |                         |                      |          |                    |                    |                      |                                         | 0.56               | 0.32  |
| T.air_15_cm.min5p     |                |        | 2.67                    | 4.03                 |             |                 |                         |                      |          |                    |                    |                      | 3.22                                    | 0.40               | 0.64  |
| T.air_15_cm.max95p    | 1.00           | 1.00   |                         |                      | 3.00        |                 |                         |                      |          |                    |                    |                      |                                         | 0.40               | 3.09  |
| T.air_15_cm.drange    | 1.00           |        | 2.61                    |                      |             | 4.67            |                         |                      |          |                    |                    |                      | 3.00                                    | 0.56               | 1.58  |
| T.air_15_cm.GDD5      | 1.00           | 4.57   |                         |                      |             |                 |                         | 5.53                 |          |                    |                    |                      | 4.04                                    | 0.66               | 93.15 |
| T.air_15_cm.FDD0      |                |        | 3.45                    |                      |             |                 |                         |                      | 5.34     |                    |                    |                      | 3.00                                    | 0.45               | 18.32 |
| T.soil_8_cm.mean      | 3.49           |        |                         |                      |             |                 |                         |                      |          | 1.00               |                    |                      | 3.00                                    | 0.59               | 0.51  |
| VWC.soil 0 15 cm.mean | 3.26           |        |                         |                      |             |                 |                         |                      |          |                    | 4.24               | 3.25                 | 0.47                                    | 0.07               |       |

## Tvorba vrstev a jejich zpracování

Na základě vytvořených statistických modelů byly připraveny rastrové mapové vrstvy mikroklimatu v digitálním formátu GeoTIFF pomocí prostorové predikce modelu pro celé zájmové území s využitím balíčku *raster* (Hijmans, 2020) a jejich vizualizace pomocí balíčků *ggplot2* (Wickham, 2016) a *stars* (Pebesma, 2021) v programu R. Predikce byly oříznuty hranicemi parku rozšířenými o obalovou zónu 50 metrů, následně byly vyříznuty plochy rybníků, protože pro predikci teploty nad rybníky nemáme dostatek dat.

## Výsledky

V jednotlivých modelech byly signifikantní různé proměnné. Nejčastěji se jednalo o index tepelného požitku stanoviště (dah), následovaný topografickým vlhkostním indexem SAGA (sagawi) a výškou porostu (height\_average\_max\_void). Jedná se o typické proměnné s častým vlivem na mikroklima (Kašpar et al., 2021). Častý vliv prostorového tenzoru ukazuje nejčastěji na gradient tepelného ostrova Prahy.

U průměrné roční teploty nebyl průkazný vliv porostu, což může být způsobeno snižováním teplot v létě a ochranou před mrazem v zimě. Tomu odpovídá i mapa minimálních a maximálních teplot, u kterých byl odpovídající vliv výšky porostu patrný. Lesní porosty proto poskytují stabilnější klima, jak je patrné i na mapě průměrného denního rozsahu teplot. Mapa sumy denních teplot pod 0 °C ukazuje, že porosty chrání i před promrzáním, což může být klíčové pro mnohé rostliny (např. rhododendrony) v podrostu. Na rozdíl od teploty vzduchu je chladicí vliv porostu patrný u průměrné teploty půdy, což odpovídá většímu vlivu letního chlazení oproti izolaci v zimě. Suma denních teplot nad 5 °C odpovídá průměrné teplotě, avšak s přidaným vlivem vlhkostního indexu.

Průměrná objemová vlhkost půdy je ovlivněna především tepelným režimem stanoviště a vertikální vzdáleností od vody. Pro lepší modelování by bylo třeba provést detailní půdní zrnitostní průzkum lokalit i celého parku.

## Publikace vrstev

V prostředí ArcGIS Pro 3.4.3 (Esri Inc. 2025) byly následně publikovány jednotlivé vrstvy ve formě WMTS v prostředí ArcGIS Online Botanického ústavu. Vrstvy byly publikovány veřejně. Pro interaktivní část byla následně publikována polygonová vrstva s hodnotami jednotlivých rastrů pro každý pixel 5 × 5 m ve formátu WFS a také jednotlivé rastry ve formátu GeoTIFF ke stažení pro offline využití.

Pro zobrazení rastrů jsou použity vědecké barevné škály (Crameri 2023), které jsou navrženy s důrazem na vědeckou přesnost, percepční rovnoměrnost a vizuální interpretovatelnost (průměrné teploty, objemová vlhkost půdy). Pro ostatní mapy byly využity škály z balíčku viridis (Garnier et al., 2024), který nabízí široce používané, barevně vyvážené palety optimalizované pro různé zobrazovací platformy. Tyto škály jsou plně reprodukovatelné, dobře čitelné i při tisku a poskytují konzistentní výsledky napříč softwarem a prostředím.

## Specifikace výzkumem zjištěných poznatků

Mapy byly publikovány v několika formátech pro využití v geografických informačních systémech (GIS) online i offline. Základním výsledkem jsou rastry ve formátu GeoTIFF, které byly následně publikovány formou WMTS a WFS a využity v interaktivním rozhraní.

## Technické parametry

### Rastry ve formátu GeoTIFF:

Souřadnicový systém: S-JTSK / Krovak East North, EPSG: 5514, prostorové rozlišení 5 m.

Rozsah: Top: -1053742.5 m, Bottom: -1056347.5 m, Left: -736007.5 m, Right: -733517.5 m

### WMTS:

Standard/protokol: OGC WMTS 1.0.0 (podporuje standardní KVP dotazy i RESTful šablony ResourceURL).

Typ služby: ArcGIS MapServer (cache) zpřístupněný jako WMTS.

Souřadnicový systém: WGS 1984 Web Mercator, EPSG:3857, prostorové rozlišení 5 m

Úrovně detailu (LOD): 12–22.

Formát: smíšená cache (image/png a image/jpeg).

Export dlaždic povolen: (Max. export 100 000 dlaždic).

### WFS:

Standard/protokol: FeatureServer (ArcGIS REST)

Verzovaná data: ne

Maximální počet záznamů na dotaz: 2000

Podporované formáty dotazů: JSON (např. GeoJSON, PBF...)

Jednotlivé vrstvy v rámci služby (ID v závorce)

1. T\_air\_15\_cm\_mean (1)
2. T\_air\_15\_cm\_min5p (2)
3. T\_air\_15\_cm\_max95p (3)
4. T\_air\_15\_cm\_drangle (4)
5. T\_air\_15\_cm\_GDD5 (5)
6. T\_air\_15\_cm\_FDD0 (6)
7. T\_soil\_8\_cm\_mean (7)
8. VWC\_soil\_0\_15\_cm\_mean (8)

Souřadnicový systém: WGS 1984 Web Mercator, EPSG:3857

Odkaz:

[https://services3.arcgis.com/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/Mikroklimatické\\_proměnné\\_WFL1/FeatureServer](https://services3.arcgis.com/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/Mikroklimatické_proměnné_WFL1/FeatureServer)

## Online interaktivní rozhraní

ArcGIS storymap: <https://arcg.is/1zqTKK0> včetně všech náležitostí Nimap

Pro samotné prohlížení map: <https://arcg.is/1u4iW43>



## Jednotlivé mapy ve formátu TIFF (S-JTSK / Krovak East North, EPSG: 5514)

| Název                                                      | Adresa                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Průměrná teplota vzduchu při zemi (15 cm)                  | <a href="https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/4fed2ce33c4c4e299bc9acd3552e691f/data">https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/4fed2ce33c4c4e299bc9acd3552e691f/data</a> |
| Minimální teplota vzduchu při zemi (5. percentil) (15 cm)  | <a href="https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/097cfdc8d9ca4e46ba469f73cc445273/data">https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/097cfdc8d9ca4e46ba469f73cc445273/data</a> |
| Maximální teplota vzduchu při zemi (95. percentil) (15 cm) | <a href="https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/a685c33bf8c14e91a1dcba39b3834f34/data">https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/a685c33bf8c14e91a1dcba39b3834f34/data</a> |
| Průměrný denní rozsah teplot vzduchu při zemi (15 cm)      | <a href="https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/27e36380d00243bc9b2af71d28e1c6ac/data">https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/27e36380d00243bc9b2af71d28e1c6ac/data</a> |
| Suma denních teplot >5 °C (15 cm)                          | <a href="https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/c9c63f2535d240dabad9f0ab672f52f0/data">https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/c9c63f2535d240dabad9f0ab672f52f0/data</a> |
| Suma denních teplot < 0 °C (15 cm)                         | <a href="https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/cff9728fea3c4beb83b1e5ddb614c94f/data">https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/cff9728fea3c4beb83b1e5ddb614c94f/data</a> |
| Průměrná teplota půdy (-8 cm)                              | <a href="https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/d4032bed45364c7d9bcb1435cf446943/data">https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/d4032bed45364c7d9bcb1435cf446943/data</a> |
| Průměrná objemová vlhkost půdy (0 až -15 cm)               | <a href="https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/a340efc983f943108d4da0c2ea8d48be/data">https://ibot.maps.arcgis.com/sharing/rest/content/items/a340efc983f943108d4da0c2ea8d48be/data</a> |

## Jednotlivé mapy ve formátu WMTS (WGS 1984 Web Mercator, EPSG:3857)

| Název                                                      | Adresa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Průměrná teplota vzduchu při zemi (15 cm)                  | <a href="https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_mean/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=8b2468d49a1fb30e">https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_mean/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=8b2468d49a1fb30e</a>           |
| Minimální teplota vzduchu při zemi (5. percentil) (15 cm)  | <a href="https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_min5p/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=86efe7bd9ea2bf1e">https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_min5p/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=86efe7bd9ea2bf1e</a>         |
| Maximální teplota vzduchu při zemi (95. percentil) (15 cm) | <a href="https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_max95p/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=9b730c725c465ca1">https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_max95p/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=9b730c725c465ca1</a>       |
| Průměrný denní rozsah teplot vzduchu při zemi (15 cm)      | <a href="https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_drang/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=a78580ef81112fe1">https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_drang/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=a78580ef81112fe1</a>         |
| Suma denních teplot >5 °C (15 cm)                          | <a href="https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_GDD5/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=8355cee949af8b03">https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_GDD5/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=8355cee949af8b03</a>           |
| Suma denních teplot < 0 °C (15 cm)                         | <a href="https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_FDD0/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=b881f2842decc868">https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_air_15_cm_FDD0/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=b881f2842decc868</a>           |
| Průměrná teplota půdy (-8 cm)                              | <a href="https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_soil_8_cm_mean/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=8a7697d2498a4858">https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/T_soil_8_cm_mean/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=8a7697d2498a4858</a>           |
| Průměrná objemová vlhkost půdy (0 až -15 cm)               | <a href="https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/VWC_soil_0_15_cm_mean/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=9d7e198431da22e5">https://tiles.arcgis.com/tiles/2644d0TnmFsZW7Ud/arcgis/rest/services/VWC_soil_0_15_cm_mean/MapServer/WMTS/1.0.0/WMTSCapabilities.xml?cacheKey=9d7e198431da22e5</a> |

### III) Srovnání „novosti postupů“ oproti původní mapě, pokud existuje, nebo jejich zdůvodnění, pokud se bude jednat o novou originální interaktivní mapu, a jejich srovnání s postupy v zahraničí,

Soubor mikroklimatických map s prostorovým rozlišením 5 m vznikl syntézou mikroklimatických dat získaných z nově vytvořené detailní sítě mikroklimatických stanic. Svým rozsahem a hustotou bodové sítě se jedná o jeden z dosud nejdetailnějších a prostorově nejrepresentativnějších souborů dat o mikroklimatu nejen v kontextu ČR, ale i v celosvětovém měřítku. Obdobně hustá síť měření byla zatím v ČR provozována pouze na malých lokalitách (několik ha). Počtem stanic je tato síť srovnatelná například s naší sítí v NP České Švýcarsko, kde je však monitorováno 79 km<sup>2</sup> (Man et al., 2022). Zároveň se jedná o první interaktivní zpřístupnění podobných údajů, doposud byla data publikována pouze formou rastrů určených k dalšímu zpracování (Man et al., 2022; Brůna et al., 2025; Haesen et al., 2021; Haesen et al., 2023b).

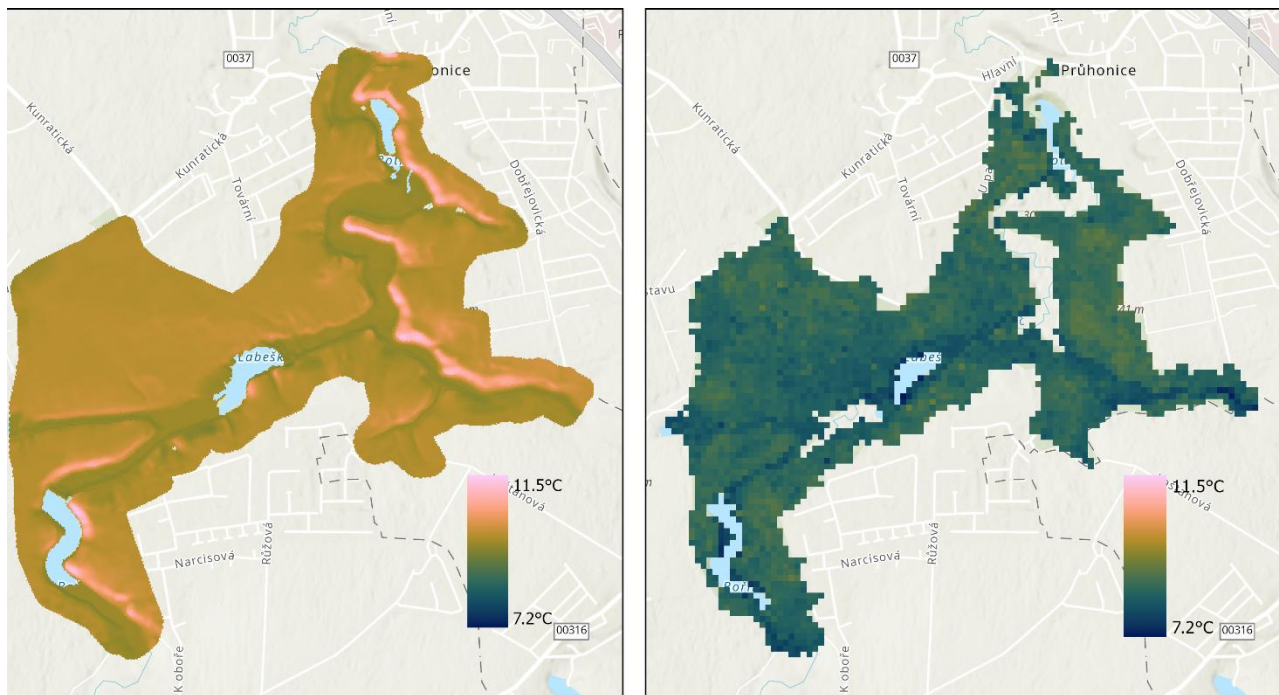
Před vznikem tohoto souboru map se klimatické charakteristiky parku opíraly o offsety lokálních měření mikroklimatickými čidly vůči klimatické stanici v dendrologické zahradě. V těch však byly postiženy jen některé gradienty prostředí a největší váha byla přikládána lesním porostům. Data z těchto měření nebyla interpolována do mapy, ale data byla využita pro clusterovou analýzu topografie, která vedla k vylišení šesti topoklimatických jednotek na území parku (Wild et al., 2014). Rastrová data jednotlivých charakteristik klimatu však zatím dostupná nebyla.

Byly dostupné pouze hrubé rastry s rozlišením v řádu stovek metrů založené na interpolaci dat ze stanic ČHMÚ, případně rozsáhlejší datasety jako WorldClim (1 km<sup>2</sup>; Fick & Hijmans, 2017), CHELSA (1 km<sup>2</sup>; Karger et al., 2017) a TerraClimate (16 km<sup>2</sup>; Abatzoglou et al., 2018) nebo ERA5-Land (81 km<sup>2</sup>, Muñoz-Sabater et al., 2021).

Zatímco běžné klimatické mapy interpolují hodnoty naměřené na stanicích zpravidla pouze na základě prostorových vztahů s přihlédnutím k nadmořské výšce (metody vážené inverzní vzdáleností, kriging) v sítích s hrubým prostorovým rozlišením (zpravidla kilometry až desítky kilometrů), my jsme pro prostorovou interpolaci naměřených mikroklimatických dat využili přesný digitální model terénu (DMR 5G od ČÚZK) a mračno bodů reprezentující nadzemní vegetaci, které vzniklo jako výsledek snímkování dronem s průměrnou hustotou 56 bodů na m<sup>2</sup>. Z digitálního modelu byly odvozeny topografické proměnné reprezentující topografické fenomény relevantní pro utváření mikroklimatu. Z bodového mračna byla vypočtena výška porostů a hustotní charakteristiky vegetačního krytu. Dále byly využity detailní mapy vodních ploch pro zohlednění vlivu vody na utváření mikroklimatu.

Nejpodobnějším datovým zdrojem je sada ForestTemp (Haesen et al., 2021) s rozlišením 25 m, která je však omezena pouze na lesní porosty. Opírá se o velké množství podobných stanic a interpoluje teplotu ve výšce 15 cm nad zemí jako naše mapy. Kromě omezení na lesní porosty a nižšího rozlišení se liší i hodnoty, například průměrná teplota na území lesních porostů Průhonického parku je v rozsahu 7,2 – 9,1 °C, kdežto naše mapy mají rozsah pro celý park 9,3 – 11,5 °C (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). ForestClim (Haesen et al., 2023b)

na ForestTemp navazuje a přidává další klimatické proměnné, ale rozdíly jsou stejné jako u ForestTemp, tedy nižší rozlišení a omezení na lesní porosty.



Obrázek 3 Srovnání průměrné roční teploty v našem rastru (vlevo) a v datové sadě ForestTemp (vpravo). Legenda byla sloučena, aby vynikl rozdíl hodnot obou map.

Mikroklimatické mapy vznikly prostorovou predikcí pomocí moderních statistických metod: zobecněných aditivních modelů s výběrem vysvětlujících parametrů včetně interakcí pomocí metod strojového učení a křížové validace. Mikroklimatické mapy s takto jemným prostorovým rozlišením, založené na datech z laserového skenování, snímkování dronem a in-situ měření postihující celý gradient zápoje porostu od lučních enkláv až po husté lesy, jsou unikátní i ve světovém měřítku. Autorům nejsou totiž známy obdobné mapy, jež by tímto způsobem dokumentovaly mikroklima v památkách zahradního umění, zapsaných na Seznam světového dědictví (UNESCO).

## **IV) Návrh využití výsledku (definování subjektů, které by měly být uživateli výsledků)**

Tyto mapy slouží primárně jako podklady pro správu Průhonického parku pro plánování výsadeb s ohledem na mikroklimatické poměry. Jsou též podkladem pro analýzy přežívání jednotlivých druhů rostlin v rámci parku. Ve spojení s historickými materiály lze zkoumat i úspěšnost výsadeb z doby založení parku i z pozdějších období. Z tohoto důvodu jsou mapy publikovány nejen v interaktivním rozhraní ArcGIS Online Botanického ústavu, ale i vyhotoveny ve formátu GeoTIFF pro snadné využití v geografických informačních systémech (GIS) a statistickém prostředí R. Výsledky ve formátu GeoTIFF jsou též ke stažení online. Slouží rovněž pro interpretaci hodnot Průhonického parku a schopností jeho tvůrce, hraběte Arnošta Silva-Taroucy.

Jak je výše uvedeno, lze v Průhonickém parku najít lokality odpovídající oblastem od středních Čech až po jih Slovenska. Mapy proto mohou rovněž sloužit pro správce jiných památek zahradního umění, neboť mohou být využity jako vodítko při obnově těchto památek v souvislosti s klimatickou změnou a pomáhat jejich správcům hledat náhrady za sortimenty, které v těchto památkách již není možné udržet z důvodu změny stanovištních podmínek nebo z důvodu absence náročné péče, běžné v minulosti (zálivka, zimní ochrana).

Mapy mohou být využity jako vzory pro pořízení obdobných map pro nejvýznamnější památky zahradního umění, zejména těch zapsaných na Seznam světového dědictví (UNESCO), jež si vzhledem ke svému světovému významu zaslouží co nejefektivnější péči.

Mapy jsou využitelné pro výuku na odborných středních a vysokých školách, které vyučují předměty dendrologie, zahradní a krajinářská architektura a péče o zeleň, kdy demonstrace a vysvětlení mapy v souvislosti s návštěvou modelového objektu umožní studentům pochopit vzájemné vztahy mezi mikroklimatickými podmínkami stanoviště a vhodnými rostlinami a jejich aplikaci při navrhování výsadeb a péči o ně.

## **V) Výčet konkrétních subjektů/skupin uživatelů, pro které je mapa určena**

Botanický ústav Akademie věd České republiky

Národní památkový ústav

Krajský úřad Středočeského kraje (orgán památkové péče)

Zahradnická fakulta Mendelovy univerzity v Brně

Národní zemědělské muzeum

Výzkumný ústav pro Krajinu (dříve Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví)

Fakulta životního prostředí České zemědělské univerzity

Národní hřebčín Kladruby nad Labem

## **VI) Seznam publikací, které přímo předcházely výsledku interaktivní specializovaná mapa s odborným obsahem a byly publikovány (pokud existují), případně výstupy z originální práce.**

Brůna J., Klinerová T., Konopová Z., Kalčík V., Kirschner J., 2023. Mikroklima a introdukce rostlin v zahradním umění. Zahradnictví 18–20.

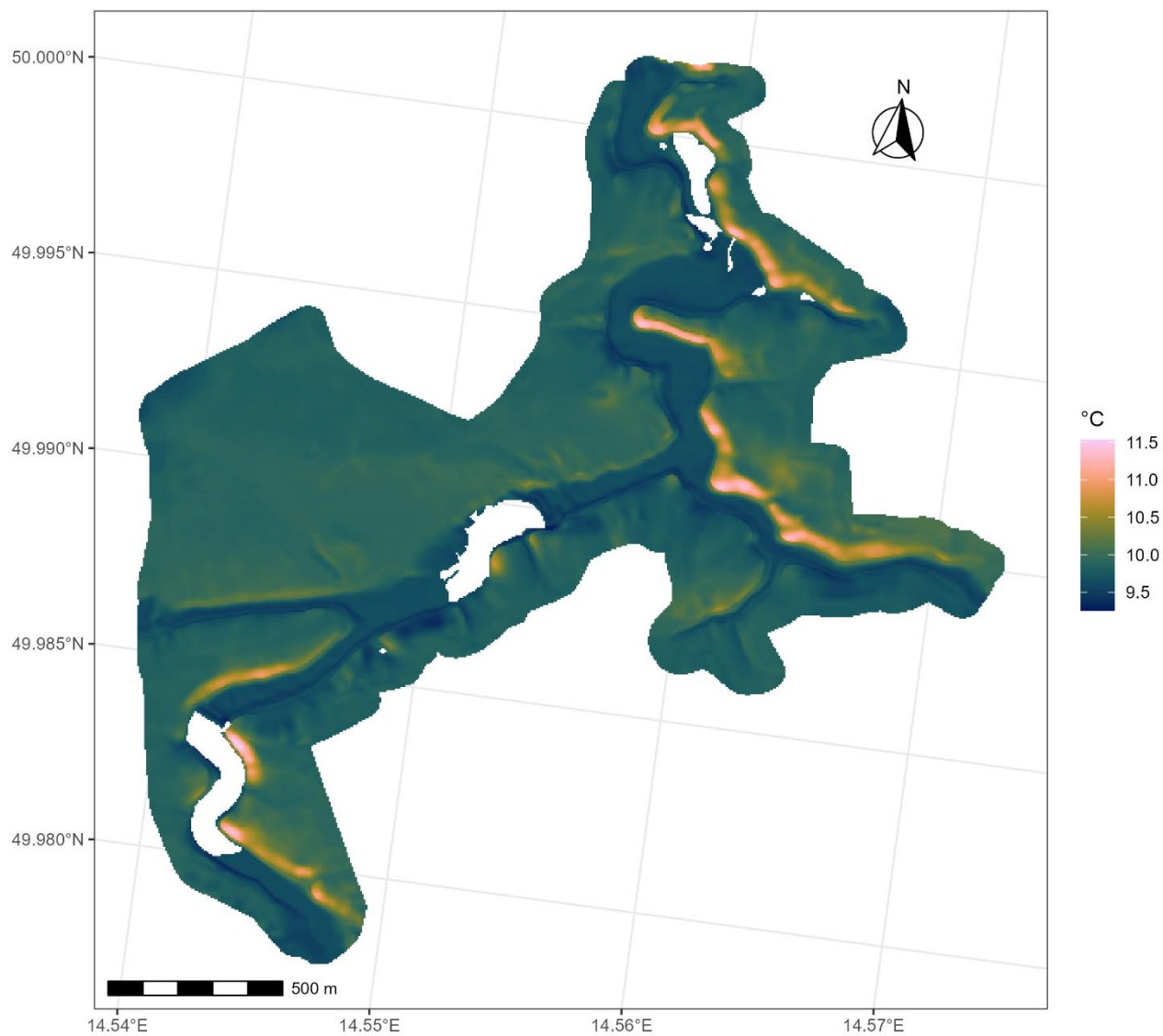
Brůna J., Klinerová T., Konopová Z., Kalčík V., Kirschner J., 2024. Rozdíly ve vlivu vybraných jehličnanů na mikroklima. Zahradnictví 26–29.

Wild J., Kirschner J., Moravec D., Kohlová J., 2014. Microclimate measurement as one of the prerequisites for succesful introduction of ornamental trees. Acta Pruhoniciana vol. 108: s. 5–13.

## **VII) Číslovaný seznam přiložených map**

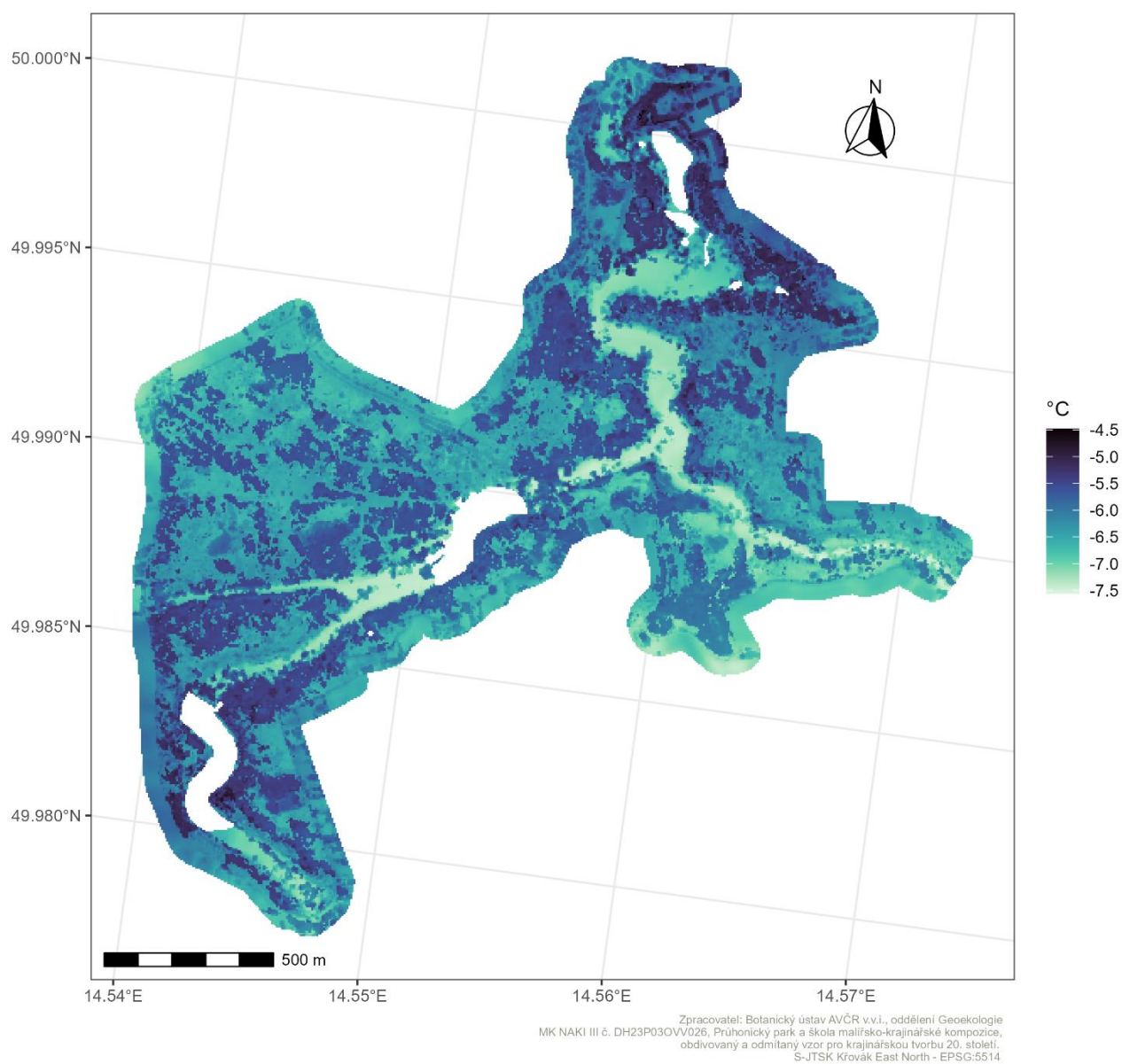
|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Mapa 1 Průměrná teplota vzduchu při zemi (15 cm) .....                  | 18 |
| Mapa 2 Minimální teplota vzduchu při zemi (15 cm) (5. percentil) .....  | 19 |
| Mapa 3 Maximální teplota vzduchu při zemi (15 cm) (95. percentil) ..... | 20 |
| Mapa 4 Průměrný denní rozsah teplot vzduchu při zemi (15 cm) .....      | 21 |
| Mapa 5 Suma denních teplot >5 °C (15 cm) .....                          | 22 |
| Mapa 6 Suma denních teplot < 0 °C (15 cm) .....                         | 23 |
| Mapa 7 Průměrná teplota půdy (-8 cm) .....                              | 24 |
| Mapa 8 Průměrná objemová vlhkost půdy (0 až -15 cm) .....               | 25 |

**Mapa 1 Průměrná teplota vzduchu při zemi (15 cm)**

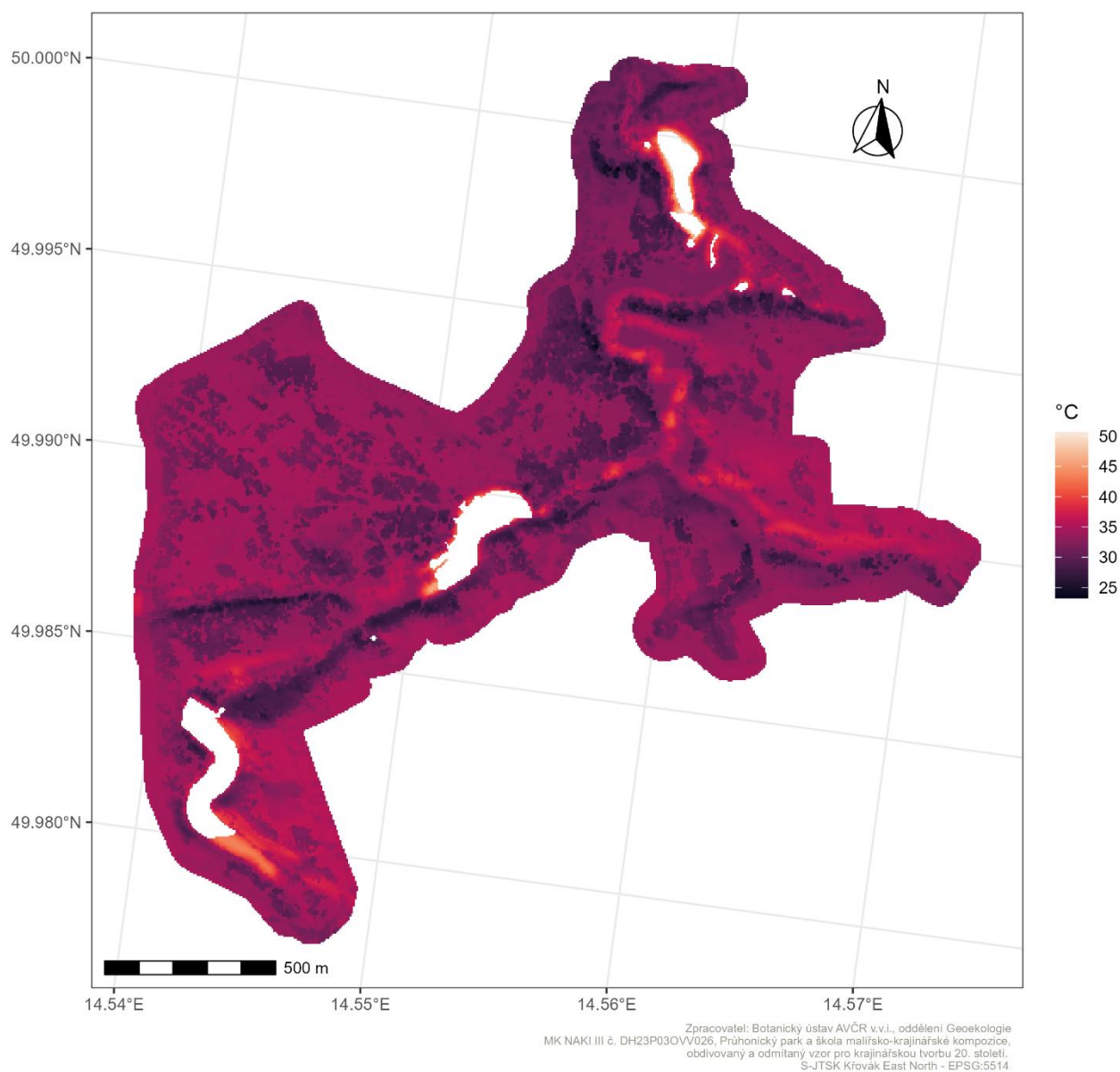


Zpracovatel: Botanický ústav AVČR v.v.i., oddělení Geoekologie  
MK NAKI III č. DH23P03OVV026, Průhonický park a škola maliřsko-krajinářské kompozice,  
obdivovaný a odměňovaný vzor pro krajinářskou tvorbu 20. století,  
S-JTSK Křivák East North - EPSG:5514

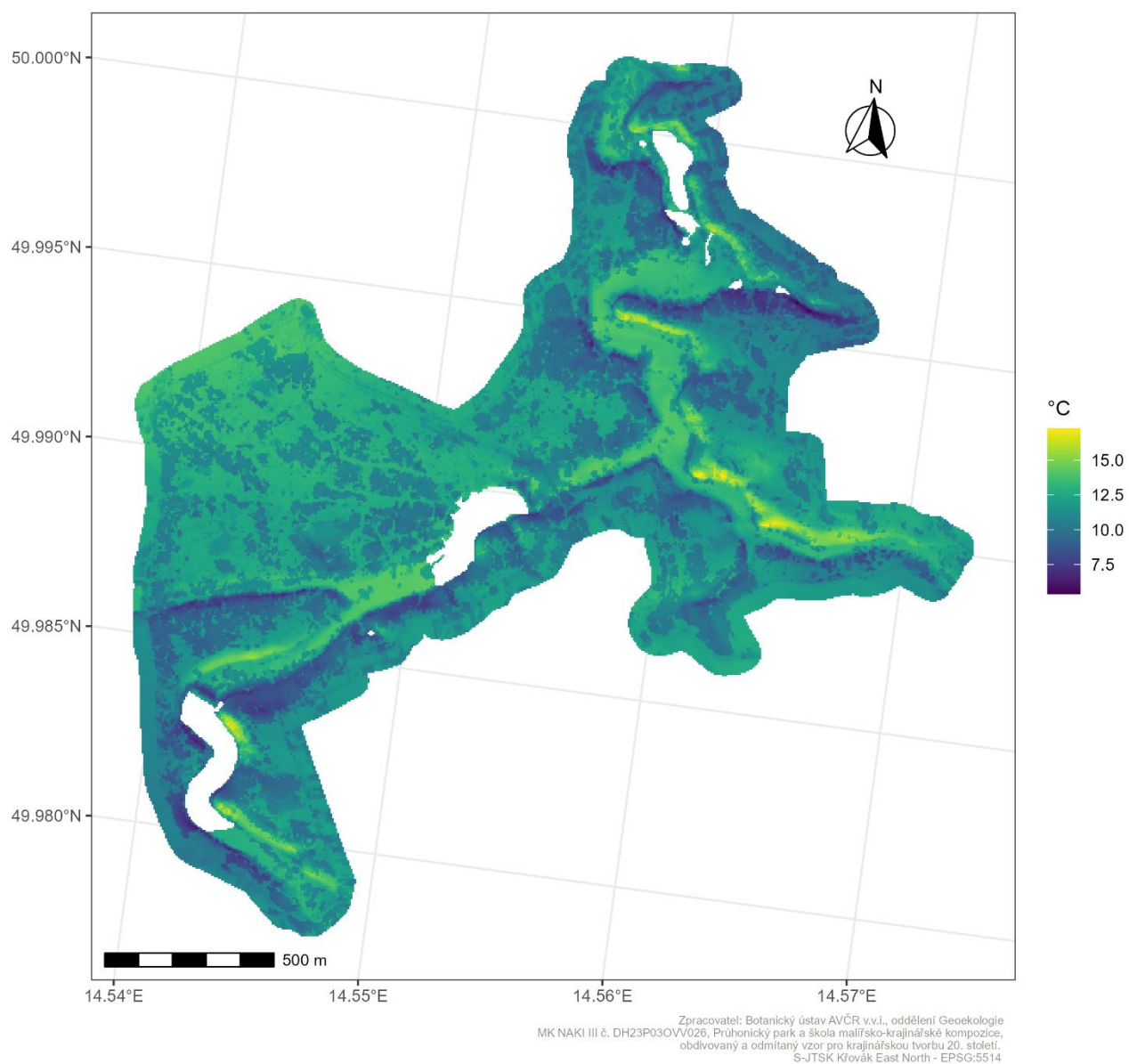
**Mapa 2 Minimální teplota vzduchu při zemi (15 cm) (5. percentil)**



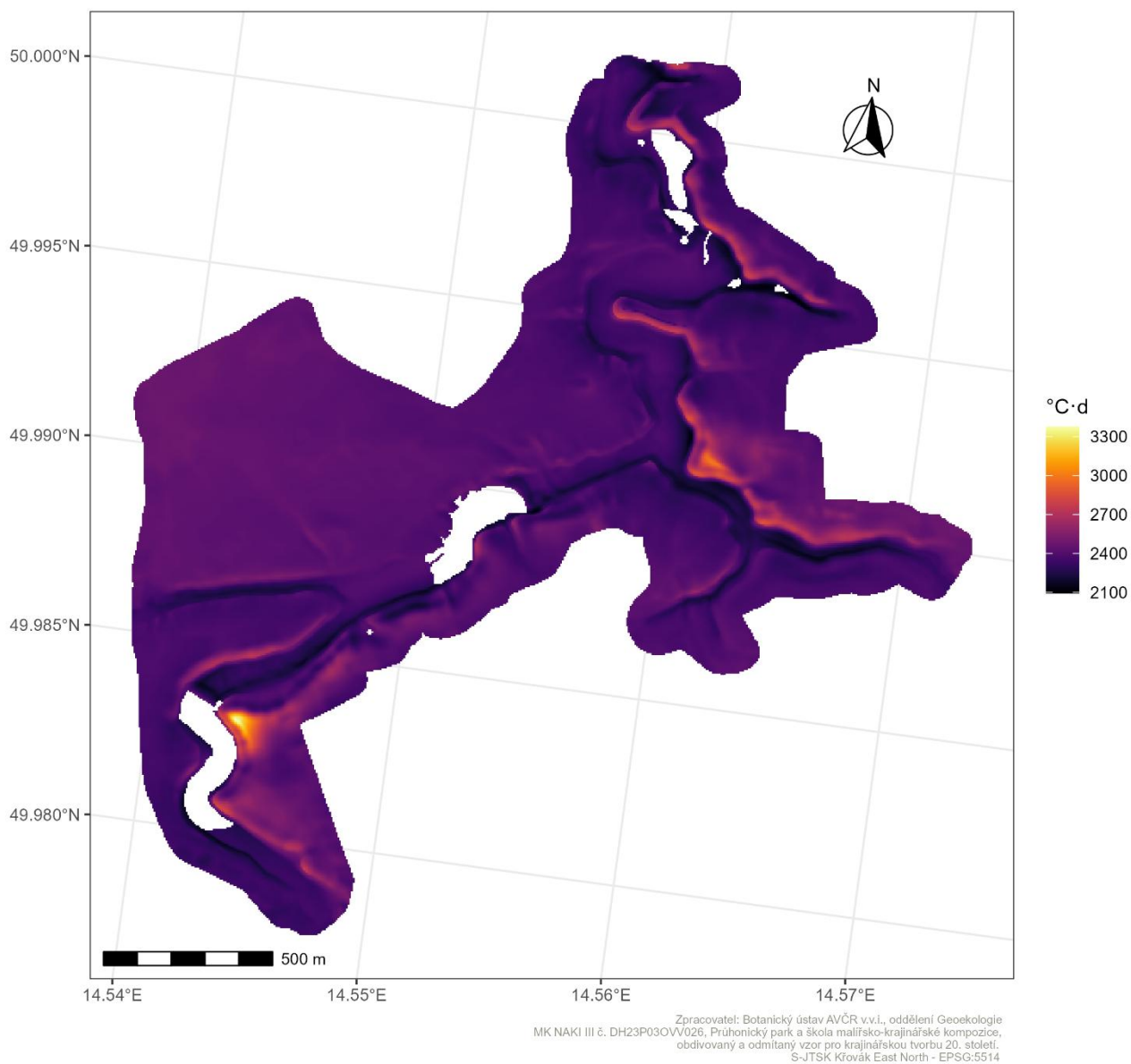
**Mapa 3 Maximální teplota vzduchu při zemi (15 cm) (95. percentil)**



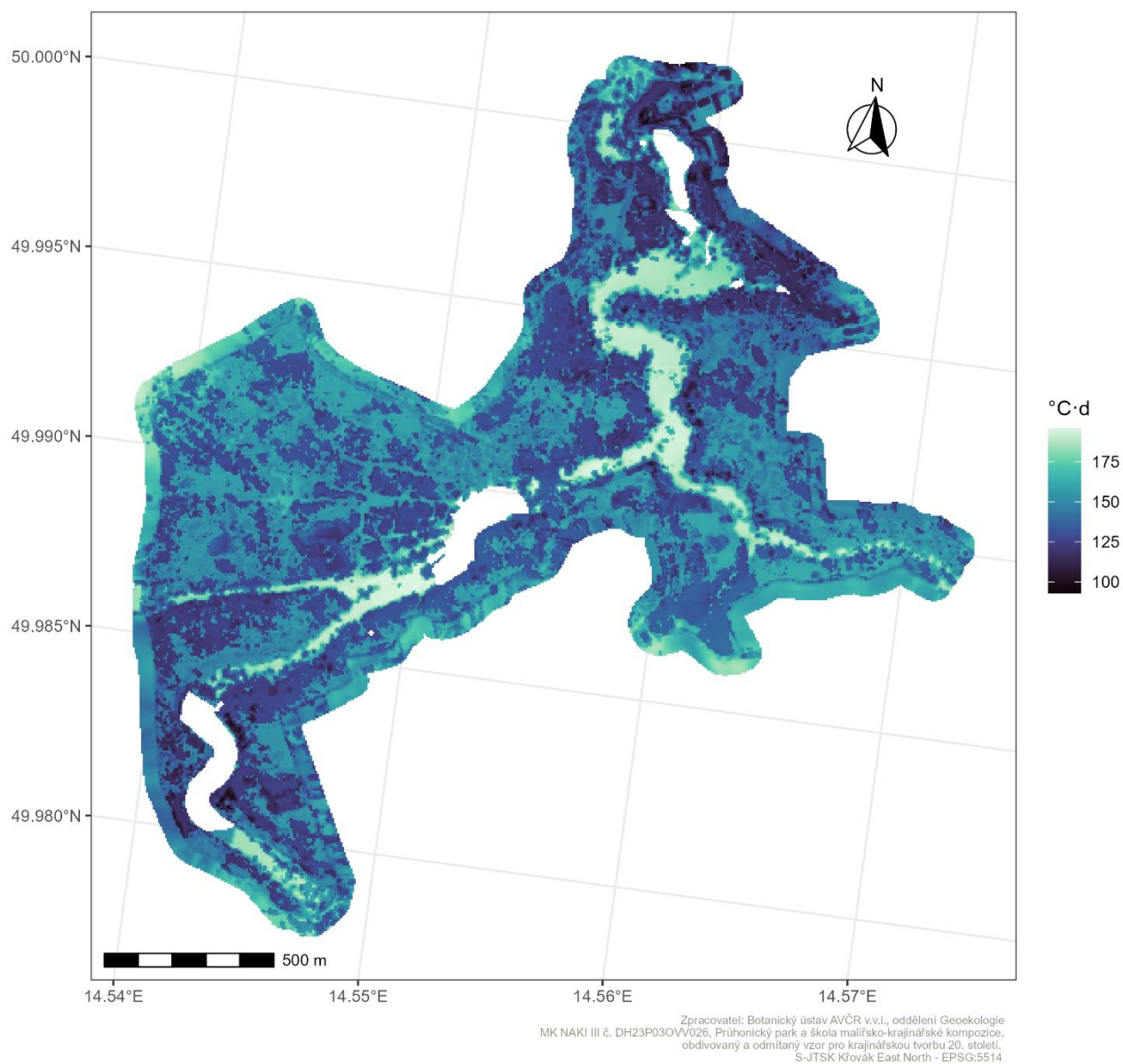
**Mapa 4 Průměrný denní rozsah teplot vzduchu při zemi (15 cm)**



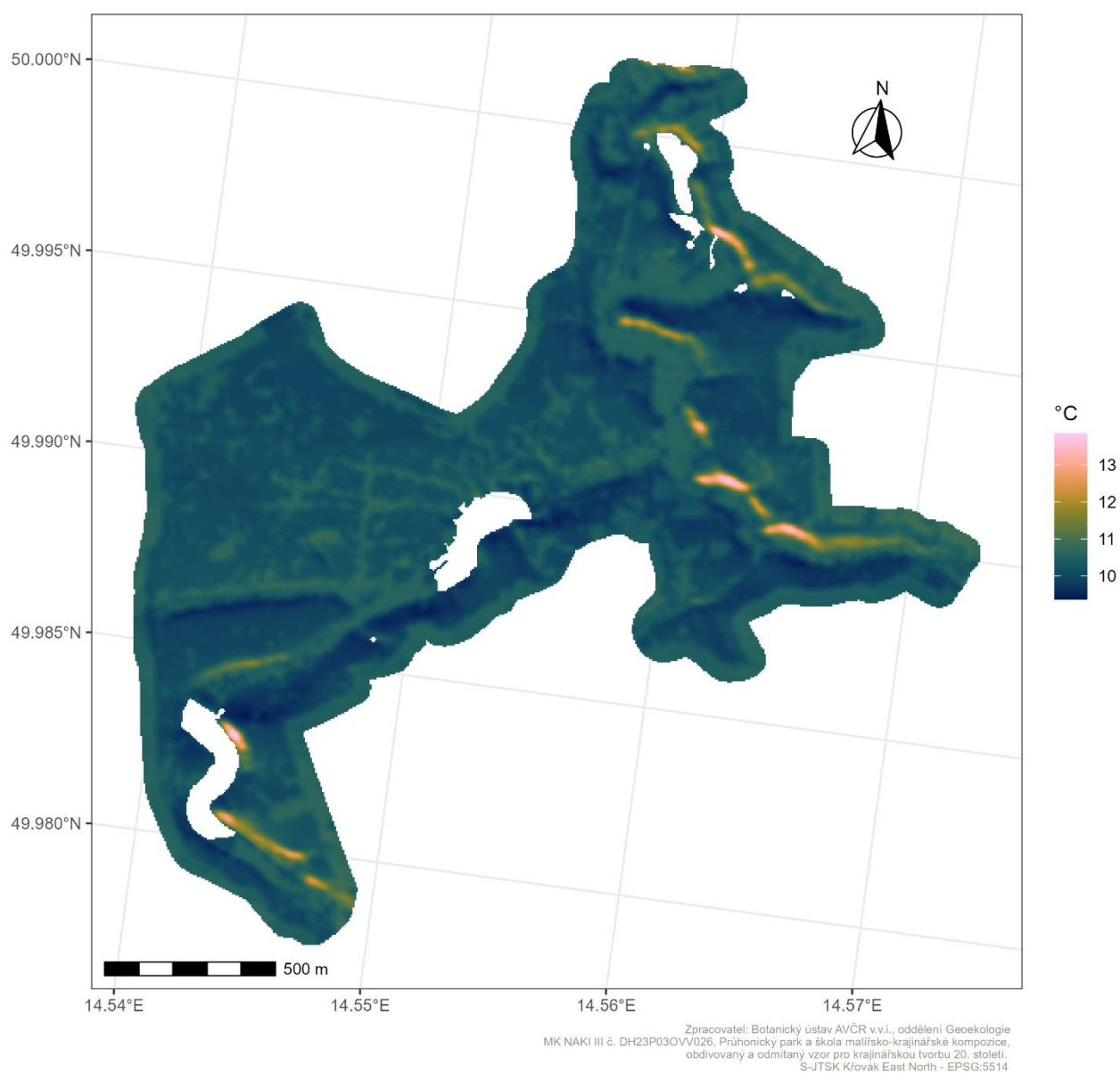
## Mapa 5 Suma denních teplot >5 °C (15 cm)



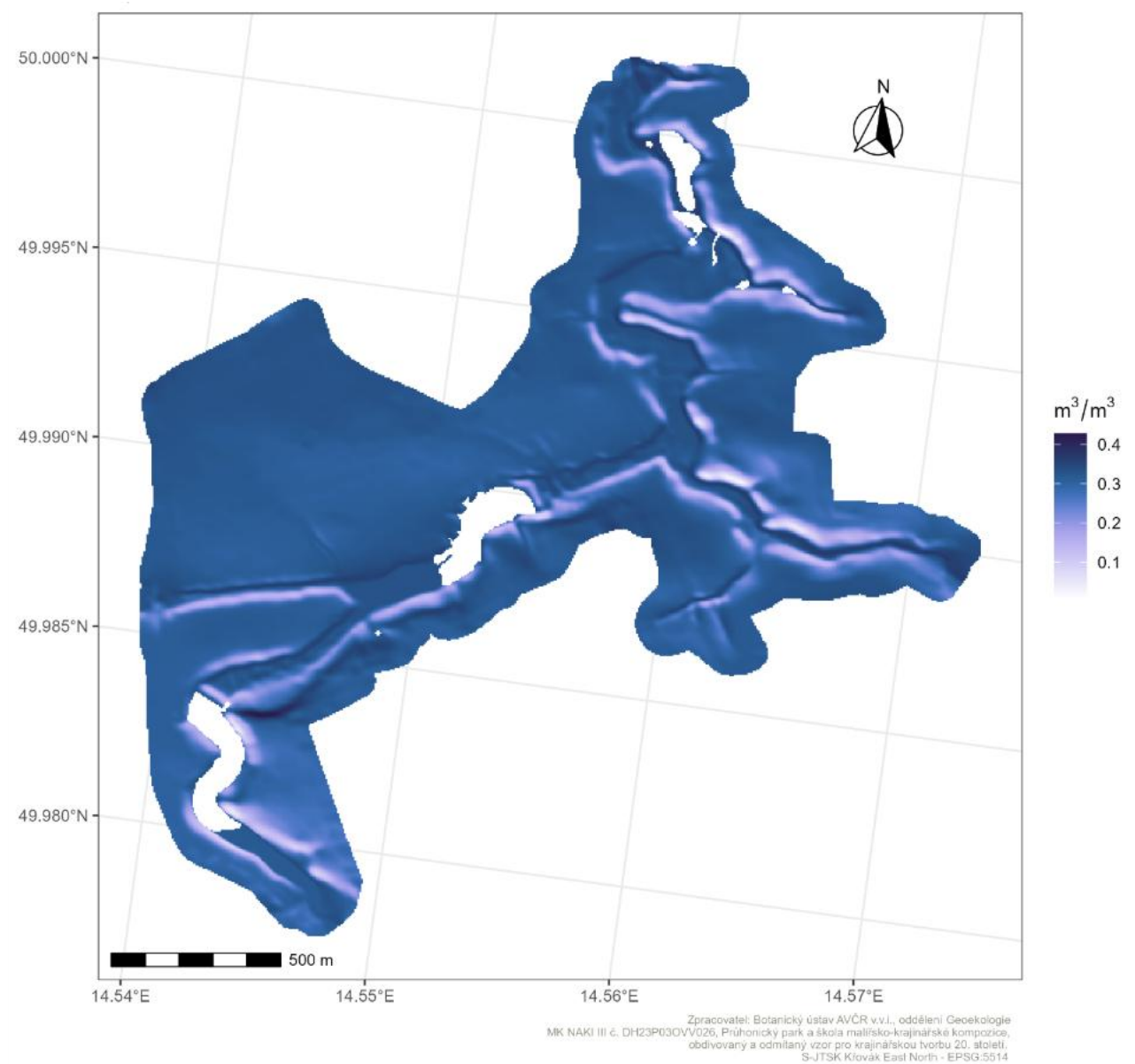
**Mapa 6 Suma denních teplot < 0 °C (15 cm)**



## Mapa 7 Průměrná teplota půdy (-8 cm)



**Mapa 8 Průměrná objemová vlhkost půdy (0 až -15 cm)**



## VIII) Seznam použité literatury

- Aalto J., Tyystjärvi V., Niittynen P., Kemppinen J., Rissanen T., Gregow H., Luoto M., 2022. Microclimate temperature variations from boreal forests to the tundra. *Agricultural and Forest Meteorology* 323: 109037. doi: 10.1016/j.agrformet.2022.109037
- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., Hegewisch, K. C., 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data* 5, Article 170191. doi: 10.1038/sdata.2017.191
- Ashcroft M.B., Cavanagh M., Eldridge M.D.B., Gollan J.R., 2014. Testing the ability of topoclimatic grids of extreme temperatures to explain the distribution of the endangered brush-tailed rock-wallaby (*Petrogale penicillata*). *Journal of Biogeography* 41: 1402–1413. doi: 10.1111/jbi.12298
- Brůna J., Klinerová T., Kopecký M., Macek M., Man M., Růžicková A., Wild, J., 2024. Metodika práce s časovými řadami klimatických dat a s mikroklimatickými mapami. 1–96.
- Brůna J., Macek M., Man M., Hederová L., Klinerová T., Moudrý V., Heurich M., Červenka J., Wild J., Kopecký M., 2025. High-resolution microclimatic grids for the Bohemian Forest Ecosystem. doi: 10.5281/zenodo.14864757
- Cramer, F., 2023. Scientific colour maps (8.0.1). Zenodo. doi: 10.5281/zenodo.8409685
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 8, 1991–2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B.R., Hylander, K., Luoto, M., Vellend, M., Verheyen, K., Lenoir, J., 2019. Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology and Evolution* 3, 744–749. doi: 10.1038/s41559-019-0842-1
- 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. doi: 10.1002/joc.5086
- Frey S.J.K., Hadley A.S., Johnson S.L., Schulze M., Jones J.A., Betts M.G., 2016. Spatial models reveal the microclimatic buffering capacity of old-growth forests. *Science Advances* 2: doi: 10.1126/sciadv.1501392
- Fridley J.D. 2009. Downscaling climate over complex terrain: High finescale (<1000 m) spatial variation of near-ground temperatures in a montane forested landscape (Great Smoky Mountains). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48: 1033–1049. doi: 10.1175/2008JAMC2084.1
- Garnier, S., Ross, N., Rudis, R., Camargo, A. P., Sciaini, M., Scherer, C., 2024. viridis(Lite) - Colorblind-Friendly Color Maps for R. viridis package version 0.6.5.
- Geiger R., Aron R.H., Todhunter. P., 2009. The Climate near the ground, Rowman & Littlefield Publishers, Lanham, Maryland
- Greiser C., Ehrlén J., Meineri E., Hylander K., 2020. Hiding from the climate: Characterizing microrefugia for boreal forest understory species. *Global Change Biology* 26: 471–483. doi: 10.1111/gcb.14874
- Greiser C., Meineri E., Luoto M., Ehrlén J., Hylander K., 2018. Monthly microclimate models in a managed boreal forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology* 250–251: 147–158. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.12.252
- Grimmond C., Robeson S., Schoof J. 2000. Spatial variability of micro-climatic conditions within a mid-latitude deciduous forest. *Climate Research* 15: 137–149. doi: 10.3354/cr015137
- Haesen S., Lembrechts J.J., De Frenne P., Lenoir J., Aalto J., Ashcroft M.B., Kopecký M., Luoto M., Maclean I., Nijs I., Niittynen P., Hoogen J., Arriga N., Brůna J., Buchmann N., Čiliak M., Collalti A., De Lombaerde E., Descombes P., Gharun M., Goded I., Govaert S., Greiser C., Grelle A., Gruening C., Hederová L., Hylander K., Kreyling J., Kruijt B., Macek M., Máliš F., Man M., Manca G., Matula R., Meeussen C., Merinero S., Minerbi S., Montagnani L., Muffler L., Ogaya R., Penuelas J., Plichta R., Portillo-Estrada M., Schmeddes J., Shekhar A., Spicher F., Ujházyová M., Vangansbeke P., Weigel R., Wild J., Zellweger F., Van Meerbeek K., 2021. ForestTemp – Sub-canopy microclimate temperatures of European forests. *Global Change Biology* 27: 6307–6319. doi: 10.1111/gcb.15892
- Haesen S., Lembrechts J.J., De Frenne P., Lenoir J., Aalto J., Ashcroft M.B., Kopecký M., Luoto M., Maclean I., Nijs I., Niittynen P., van den Hoogen J., Arriga N., Brůna J., Buchmann N., Čiliak M., Collalti A., De Lombaerde E., Descombes P., Gharun M., Goded I., Govaert S., Greiser C., Grelle A., Gruening C., Hederová L., Hylander K., Kreyling J., Kruijt B., Macek M., Máliš F., Man M., Manca G., Matula R., Meeussen C., Merinero S., Minerbi S., Montagnani L., Muffler L., Ogaya R., Penuelas J., Plichta R., Portillo-Estrada M., Schmeddes J., Shekhar A.,

- Spicher F., Ujházyová M., Vangansbeke P., Weigel R., Wild J., Zellweger F., Van Meerbeek K., 2023b ForestClim – Bioclimatic variables for microclimate temperatures of European forests. *Global Change Biology* 29: 2886–2892. doi: 10.1111/gcb.16678
- Haesen S., Lenoir J., Gril E., De Frenne P., Lembrechts J., Kopecký M., Macek M., Man M., Wild J., Van Meerbeek K., 2023a. Uncovering the hidden niche: incorporating microclimate temperature into species distribution models, *EcoEvoRxiv*.
- Hijmans, R.J., 2020. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.4-5. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Hothorn, T., Buehlmann, P., Kneib, T., Schmid, M., Hofner, B., 2020. mboost: Model-Based Boosting, R package version 2.9-4.
- Hylander K., Greiser C., Christiansen D.M., Koelemeijer I.A. 2022. Climate adaptation of biodiversity conservation in managed forest landscapes. *Conservation Biology* 36: 1–9. doi: 10.1111/cobi.13847
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., Kessler, M., 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4, 170122. doi: 10.1038/sdata.2017.122
- Kašpar V., Hederová L., Macek M., Müllerová J., Prošek J., Surový P., Wild J., Kopecký M., 2021. Temperature buffering in temperate forests: Comparing microclimate models based on ground measurements with active and passive remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 263: 112522. doi: 10.1016/j.rse.2021.112522
- Körner, C., Hiltbrunner, E., 2018. The 90 ways to describe plant temperature. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 30, 16–21. doi: 10.1016/j.ppees.2017.04.004
- Kovács, B., Tinya, F., Ódor, P., 2017. Stand structural drivers of microclimate in mature temperate mixed forests. *Agriculture and Forest Meteorology* 234–235, 11–21. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.11.268
- Leempoel, K., Parisod, C., Geiser, C., Daprà, L., Vittoz, P., Joost, S., 2015. Very high-resolution digital elevation models: Are multi-scale derived variables ecologically relevant? *Methods in Ecology and Evolution* 6, 1373–1383. doi: 10.1111/2041-210X.12427
- Lundquist J.D., Lott F., 2008. Using inexpensive temperature sensors to monitor the duration and heterogeneity of snow-covered areas. *Water Resources Research* 44: 8–13. doi: 10.1029/2008WR007035
- Macek M., Kopecký M., Wild J. 2019. Maximum air temperature controlled by landscape topography affects plant species composition in temperate forests. *Landscape Ecology* 34: 2541–2556. doi: 10.1007/s10980-019-00903-x
- Man M., Macek M., Brůna J., Hederová L., Klinerová T., Růžičková A., Prošek J., Wild J., Kopecký M., 2022. Atlas of forest microclimate in the national parks Bohemian and Saxon Switzerland, version 1.0 <https://git.sorbus.ibot.cas.cz/matej.man/microclimate-atlas-public>, Institute of Botany of the Czech Academy of Sciences, Department of Geoecology.
- Man, M., Kalčík, V., Macek, M., Brůna, J., Hederová, L., Wild, J., Kopecký, M., 2023. myClim: Microclimate data handling and standardised analyses in R. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(9), 2308–2320. doi: 10.1111/2041-210X.14192
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. 2021. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data* 13: 4349–4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021
- Nussbaum, M., Walthert, L., Fraefel, M., Greiner, L., Papritz, A., 2017. Mapping of soil properties at high resolution in Switzerland using boosted geosadditive models. *Soil* 3, 191–210. doi: 10.5194/soil-3-191-2017
- Pebesma, E., 2021. stars: Spatiotemporal Arrays, Raster and Vector Data Cubes. R package version 0.5-2. <https://CRAN.R-project.org/package=stars>.
- R Core Team, 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Scherrer D., Schmid S., Körner C., 2011. Elevational species shifts in a warmer climate are overestimated when based on weather station data. *International Journal of Biometeorology* 55: 645–654. doi: 10.1007/s00484-010-0364-7

- Stark J.R., Fridley J.D., Gill J., 2022. Microclimate-based species distribution models in complex forested terrain indicate widespread cryptic refugia under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 31: 562–575. doi: 10.1111/geb.13447
- Stickley S.F., Fraterrigo J.M., 2021. Understory vegetation contributes to microclimatic buffering of near-surface temperatures in temperate deciduous forests. *Landscape Ecology* 36: 1197–1213. doi: 10.1007/s10980-021-01195-w
- von Arx G., Dobbertin M., Rebetez M., 2012. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology* 166–167: 144–155. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.07.018
- Wickham, H., 2016. ggplot2: elegant graphics for data analysis. springer.
- Wild J., Kirschner J., Moravec D., Kohlová J., 2014. Microclimate measurement as one of the prerequisites for successful introduction of ornamental trees. *Acta Pruhoniciana* vol. 108: s. 5–13.
- Wild J., Kopecký M., Macek M., Šanda M., Jankovec J., Haase T., 2019. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* 268: 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.018>
- Wood, S.N., 2017. Generalized additive models: An introduction with R, second edition, Generalized Additive Models: An Introduction with R, Second Edition. CRC Press. doi: 10.1201/9781315370279
- Zanchi M., Zapperi S., La Porta C.A.M., 2023. Harnessing deep learning to forecast local microclimate using global climate data. *Scientific Reports* 13: 21062. doi: 10.1038/s41598-023-48028-1
- Zellweger F., Coomes D., Lenoir J., Depauw L., Maes S.L., Wulf M., Kirby K.J., Brunet J., Kopecký M., Máliš F., Schmidt W., Heinrichs S., den Ouden J., Jaroszewicz B., Buyse G., Spicher F., Verheyen K., De Frenne P., 2019. Seasonal drivers of understorey temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. *Global Ecology and Biogeography* 28: 1774–1786. doi: 10.1111/geb.12991
- Zellweger, F., Braunsch, V., Morsdorf, F., Baltensweiler, A., Abegg, M., Roth, T., Bugmann, H., Bollmann, K., 2015. Disentangling the effects of climate, topography, soil and vegetation on stand-scale species richness in temperate forests. *Forest Ecology and Management* 349, 36–44. doi: 10.1016/j.foreco.2015.04.008