

SPREMENLJIVOST DOLŽINE RASTNE SEZONE IN TERMALNEGA ČASA V MARIBORU V OBDOBJU 1971-2020

ZALIKA ČREPINŠEK,¹ TJAŠA POGAČAR,¹
BELA KOBULNICZKY,² LUČKA KAJFEŽ-BOGATAJ,¹
NATAŠA PIPENBAHER,³ IGOR ŽIBERNA,⁴
DANIJEL IVAJNSIČ^{4,3}

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Ljubljana, Slovenija
zalika.crepinsek@bf.uni-lj.si, tjasa.pogacar@bf.uni-lj.si

² Univerza Babes-Bolyai, Fakulteta za geografijo, Cluj-Napoca, Romunija
bela.kobulniczky@ubbcluj.ro

³ Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija
natas.pipenbaher@um.si, dani.ivaajnsic@um.si

⁴ Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Maribor, Slovenija
igor.zibera@um.si, dani.ivaajnsic@um.si

Sinopsis Slovenija kljub manjšim mestom ni izjema pri pojavu mestnih toplotnih otokov. Ob višjih temperaturah zraka je v mestih spremenjena tudi vodna bilanca, oboje skupaj pa vpliva na rastne razmere rastlin. Za Maribor smo od leta 1971 do leta 2020 po treh obdobjih in kot celoto analizirali povprečne dnevne temperature zraka, začetek, konec in dolžino rastne sezone ter termalni čas pri različnih temperaturnih pragovih (0, 5 in 10 °C). V celotnem obdobju je bila povprečna letna temperatura zraka 10,9 °C, trend naraščanja je statistično značilen (0,46 °C/10 let). Pri temperaturnem pragu 5 °C se je rastna sezona v povprečju začela 8. marca in končala 20. novembra, trajala je 257 dni. Variabilnost med leti je zelo velika (SD = 21 dni), značilen trend dolžine rastne sezone (1,4 dni/10 let) lahko pripišemo tako zgodnejšemu začetku (4 dni) kot poznejšemu koncu (3 dni). Termalni čas je za vse tri temperaturne pragove največji v zadnjem obdobju (1991–2020), za prag 10 °C pa je bilo relativno povečanje največje. Vplive spremenjenih toplotnih razmer na fenološki razvoj moramo upoštevati pri strategijah prilagajanja na podnebne spremembe.

Ključne besede
rastna sezona,
termalni čas,
temperatura praga,
časovna analiza,
trend,
Maribor

GROWING SEASON LENGTH AND THERMAL TIME VARIABILITY IN MARIBOR BETWEEN 1971-2020

ZALIKA ČREPINŠEK,¹ TJAŠA POGAČAR,¹
BELA KOBULNICZKY,² LUČKA KAJFEŽ-BOGATAJ,¹
NATAŠA PIPENBAHER,³ IGOR ŽIBERNA,⁴
DANIJEL IVAJNSIČ^{4,3}

¹ University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Ljubljana, Slovenia
zalika.crepinsek@bf.uni-lj.si, tjasa.pogacar@bf.uni-lj.si

² Babes-Bolyai University, Faculty of Geography, Cluj-Napoca, Romania
bela.kobulniczky@ubbcluj.ro

³ University of Maribor, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Maribor, Slovenia
natasa.pipenbaher@um.si, dani.ivajnsic@um.si

⁴ University of Maribor, Faculty of Arts, Maribor, Slovenia
igor.zibera@um.si, dani.ivajnsic@um.si

Abstract Despite the small size of Slovenian cities, urban heat islands are still common. In addition to higher temperatures, the water balance in cities has also changed, and both together affect the growing conditions of plants. We have analyzed the average daily air temperatures, the beginning, end and length of the growing season and the thermal time at different temperature thresholds (0, 5 and 10°C) in Maribor, from 1971 to 2020, using three and the whole period. Throughout the period, the average annual air temperature was 10.9 °C, and the upward trend is statistically significant (0.46°C/10 years). At a temperature threshold of 5°C, the growing season began, on average, on March 8 and ended on November 20, lasting 257 days. Variability between years is very high (SD = 21 days); the significant growing season length trend (1.4 days/10 years) can be attributed to both the early beginning (4 days) and the later end (3 days). The thermal time for all three temperature thresholds was the highest in the most recent period (1991–2020); for the 10°C threshold, the relative increase was the largest. The effects of changed thermal conditions on phenological development must be considered in climate change adaptation strategies.

Keywords:

growing season,
growing degree
days,
base temperature,
temporal analysis,
trend,
Maribor

1 Uvod

Urbanizacija je eden največjih okoljskih izzivov, s katerimi se soočamo v zadnjih desetletjih. Zaradi zgoščene pozidave in odpadne toplote zaradi človekovih dejavnosti prihaja v urbanih območjih do sprememb površinskega albeda (odbojnosti), in s tem sevanja [1]. Posledično je spremenjena energijska bilanca, kar povzroča, da temperature na teh območjih presegajo temperature okoliškega podeželja [2]. Pojav imenujemo mestni toplotni otok (MTO). Spremembe lokalnega in regionalnega podnebja zaradi urbanega toplotnega otoka so v zadnjih letih zaradi vse večjega števila mestnih prebivalcev in pomembnega vpliva na zdravje postale vse pogostejša tema raziskav [3].

V Sloveniji je bilo v zadnjih letih narejenih nekaj raziskav o vplivu mestnega toplotnega otoka, največ v dveh največjih slovenskih mestih – Ljubljani in Mariboru [4]–[7]. Poleti je temperatura zraka v glavnem mestu v primerjavi z okolico v povprečju višja za 1,8 °C, najvišje temperaturne razlike pa so od 4 °C [5] do celo 9 °C [8]. Še posebej poletne noči ostajajo vroče [5]. Območja z višjo povprečno temperaturo so koncentrirana v industrijskih conah in nakupovalnih središčih [8], v središču Ljubljane ter ob njenih glavnih prometnih vpadnicah [6], [9]. V Ljubljani so v okviru projekta UHI (Urban Heat Island), v katerem je sodelovalo 18 partnerjev iz srednje Evrope, oblikovali tudi spletni atlas (UHI atlas). Orodje za predstavitev različnih dejavnikov za pojav mestnega toplotnega otoka [10]. V Mariboru po pregretosti izstopajo območja z večjimi stavbami (industrijska cona, večja trgovska središča), kjer so lahko temperature tudi do 4 °C višje od bližnje nepozidane okolice [7], [11]. Tudi projekcije na osnovi uporabe podnebnih scenarijev za Maribor kažejo, da se bo intenziteta MTO še stopnjevala, možno tudi za do 60 % (> 0,5 °C), predvsem v južnem industrijskem predelu mesta [7]. Značilnosti mestne klime, in s tem MTO, se pojavljajo tudi v manjših slovenskih mestih. Ivajnšič (2010) [12] je proučeval toplotni otok Ljutomera, ki je bil največji in najintenzivnejši v anticiklonalnem vremenskem tipu, ko je povprečna temperaturna razlika med mestnim jedrom in okolico znašala 2,0 °C; najmanjši in najmanj izrazit pa je bil ob ciklonalnem vremenskem tipu, ko so bile temperaturne razlike med mestom in njegovo okolico le okrog 0,3 °C. Pojav MTO v Novem mestu je prisoten predvsem v jutranjih in večernih urah ob anticiklonalnem vremenu, v obdobju od decembra do marca je povprečna razlika med centrom mesta in obrobjem znašala okrog 1 °C [13], večje so razlike pomladi in poleti, okrog 2 °C [4]. Za obdobje 1986 do 2018 so

ugotovili, da je bil MTO značilen v vseh osmih, po površini največjih slovenskih mestih: Ljubljani, Mariboru, Celju, Kranju, Kopru, Velenju, Novem mestu in Ptujju – najizrazitejši je v pomladnem in poletnem času in znaša povprečno od 2 do 3 °C [4].

Ob spremenjenih temperaturah v mestih je spremenjena tudi vodna bilanca, kar je posledica spremenjenih lastnosti površja. Meteorna voda zaradi več asfaltnih in betonskih površin odteka hitreje, zaradi manj vegetacije je zmanjšana evapotranspiracija, in s tem sta manjši tudi absolutna in relativna zračna vlaga [14]. Spremenjene toplotne in vodne razmere zaradi MTO že vplivajo na mestno zeleno infrastrukturo, ki je zelo pomembna pri zagotavljanju številnih ekosistemskih storitev, kot so zniževanje temperature, zmanjšanje onesnaženosti, ponor ogljika, zagotavljanje ustreznih bivalnih razmer in ohranjanje biotske raznovrstnosti [15], [16]. Številne raziskave so potrdile, da so razvojne stopnje rastlin, fenološke stopnje, v mestnem okolju značilno spremenjene glede na bližnje, neurbano okolje [17]. Na osnovi močne korelacije med temperaturo in časom fenoloških stopenj rastlin fenološka opazovanja zagotavljajo razmeroma poceni in enostavno sredstvo za časovno in prostorsko analizo MTO. Ob tem raziskave urbane fenologije kot bioindikatorja podnebnih sprememb [18] omogočajo oceno fenoloških trendov iz trenutnih informacij, saj lahko mesta s svojimi povišanimi temperaturami služijo kot približek za prihodnje razmere, urbana okolja pa kot terenski laboratoriji za preučevanje učinkov segrevanja na bioto [2]. Razmeroma redke so raziskave vpliva MTO na fenološke stopnje živali, še najpogostejše gre za raziskave spremenjenih vzorcev razvoja pri žuželkah [19]. Vplivi urbanizacije in podnebnih sprememb na ekosisteme so razmeroma dobro raziskani, vendar je gonilne sile teh sprememb pogosto težko ločiti drugo od druge, interakcije pa so zelo zapletene [20]. Ob neposrednih meritevah in-situ uporabljajo za raziskave vpliva urbanizacije na vegetacijo vse bolj tudi satelitske posnetke [7], [21], [22], a so pri premajhni ločljivosti satelitskih slik lahko so učinki urbanizacije na fenologijo lahko precenjeni [23].

Urbanizacija pospešuje začetek [24], [25] in zamika konec rastne sezone [2], in tako podaljšuje dolžino rastne sezone [22], [26]). Številne raziskave so potrdile, da MTO vpliva na do 10 dni zgodnejši začetek rastne dobe v urbanih predelih glede na bližnjo neurbano območje, npr. za Peking [27], mesta v delti reke Yangtze [28] in številna druga velemesta [29], [30]. Razlike v pričetku rastne sezone so zelo vezane na stopnjo vegetacije v mestih, gostoto naseljenosti urbanih predelov ter nočne temperature v

mestih [31]. Zamik rastne sezone glede na MTO jeseni kaže manjše razlike. Ding idr. (2020) [28] so v raziskavi ugotovili 7 dni kasnejši konec rastne sezone v mestnih območjih v primerjavi z bližnjimi podeželskimi, Meng idr. (2021) [27] ter Zhou idr. (2016) [30] 4 do 5 dni zakasnen zaključek rastne dobe, ponekod so te razlike minimalne in neznailne [29]. Nasprotno nekatere raziskave kažejo na zelo velike razlike tudi v jesenskih fenofazah. Jesensko rumenenje listja v Seulu je v centru mesta, za katerega je značilen močan MTO, nastopilo kar 15 dni kasneje kot v nepozidani okolici in je zelo povezano z nočnimi temperaturami zraka [31]. Zgodnejši pričetek in zakasnitev konca rastne sezone v urbanih predelih pomenita daljše trajanje rastne sezone, razlike pa so lahko precejšnje. Tako so za večje število mest v Združenem kraljestvu ugotovili 9 dni daljšo rastno sezono [32], enako povprečno podaljšanje rastne dobe je bilo značilno tudi za več kot 4.000 proučevanih mest v ZDA [33]. Ding idr. (2020) [28] ter Meng idr. (2021) [27] so ugotovili še večje razlike (od 14 do 16 dni), rastna doba v centru Bostona glede na bližnje podeželje pa je bila celo 18 do 22 dni daljša [34]. Vpliva urbanizacije na fenološke faze mestne vegetacije pa ne moremo posplošiti, saj se vpliv razlikuje tako glede na vrsto vegetacije [22] kot tudi glede na regionalno temperaturo. Rezultati raziskave Li idr. (2019) [35] kažejo, da so urbanizacija in temperaturne spremembe najbolj prizadele nižje rastline z velikimi specifičnimi listnimi površinami in zgodnjimi datumi cvetenja ali olistanja. Vpliv povišanih temperatur v urbanih predelih je večji v krajih z nižjimi temperaturami [29], [36], kar nakazuje, da se bodo spomladanske fenofaze z nadaljnjo urbanizacijo sicer pojavljale prej, vendar se bo trend v mestnih okoljih ob nadaljnjem segrevanju upočasnili [21]. Za 1 °C višje temperature spomladi lahko pospešijo začetek rastne sezone za 11 dni [29], [30], medtem ko za 1 °C toplejša jesen pomeni od 3 dni [29] do 10 dni kasnejši konec rastne dobe [30]. Velike razlike v stopnji pospešitve/zakasnitve razvoja glede na stopnjo segrevanja kažejo na to, da moramo pri urbani fenologiji ob temperaturi upoštevati tudi številne druge dejavnike, kot so obdobje nizkih temperatur, trajanje sončnega obsevanja [37], založenost tal s hranili [38], onesnaženost zraka in tal [39], bolezni in škodljivce rastlin, spremembe vodnega cikla. Večji odtok meteorne vode z urbanih površin in nižji nivo podtalnice v mestih lahko pomembno vplivata na razvojni krog rastlin [20]. Pločniki v mestih lahko tekom dneva akumulirajo veliko toplote, s tem se temperatura tal na teh območjih poveča, hkrati se zmanjša vlažnost tal, posledica je zgodnejše olistanje drevesnih vrst v mestnih drevoredih [40], [41]. Dodaten lahko vpliva na spremenjen razvoj rastlin v mestnih drevoredih tudi onesnaženost tal in zraka, kar lahko prevlada nad vplivom temperature [42]. Jochner idr. (2015) [43] so

analizirali povezanost med cvetenjem breze, leske in divjega kostanja v Münchnu ter kratkotrajnim/dolgotrajnim onesnaženjem zraka in ugotovili, da povišane koncentracije ozona, dušikovih oksidov in trdih delcev značilno zakasniijo začetek fenofaz cvetenja, korelacije so bile še posebej visoke v mestih glede na podeželje. Dokazali so, da se čas sproščanja cvetnega prahu v metropolitanskem območju zelo razlikuje in izpodbija domnevo, da so meritve cvetnega prahu na eni sami lokaciji reprezentativne za celotno mesto. Podobni so tudi rezultati raziskav Katza idr. (2019) [44], ki so ugotovili, da je znašala razlika februarških nočnih temperatur zraka med centrom in obrobjem Detroita kar 6 °C. Le okrog polovico analiziranih predelov mesta je imelo temperaturo znotraj razlike manjše od 1 °C, kar je pomenilo 4 dni razlike v cvetenju alergenih rastlin. Prisotnost vodnih teles v mestih lahko pomembno ublaži MTO s spremembo mikroklimatskih razmer okoliških kopenskih habitatov [19], [44], prav tako v mestnih parkih opažajo manjše podaljševanje rastne sezone, kar je posledica interakcije med MTO in učinkom hladnega otoka v parkih [45].

Predvsem pri preučevanju jesenskih fenofaz obarvanja in odpadanja listja moramo upoštevati tudi uporabo umetne svetlobe oziroma javne razsvetljave. Študija svetlobnega onesnaženja v mestih na Slovaškem je pokazala, da so pri vrstah Acer in Rhus jesenske fenofaze na delih krošenj pod lučmi nastopile v povprečju 13 do 22 dni kasneje, zaradi osvetlitve se je trajanje obarvanja listov podaljšalo za 6 do 9 dni, trajanje odpadanja listov pa za 6 do 7 dni [3], uporaba umetne svetlobe je značilno zakasnila tudi jesesko fenofazo obarvanja listja pri vrsti Platanus, kar nakazuje, da moramo pri načrtovanju in upravljanju javnih zelenih površin upoštevati tudi ta dejavnik [46].

Rastline v mestnih območjih so pogosto ob višjih temperaturah izpostavljene tudi povečanim koncentracijam CO₂, kar povzroča pričakovane prihodnje okoljske razmere. Zaradi povečane koncentracije CO₂ in višje temperature na številnih urbanih območjih severne hemisfere se je fotosintetska aktivnost začela okrog 6 dni prej in končala 5 dni kasneje kot na sosednjih podeželskih območjih. Zgodnejši začetek in vrh fotosintetske aktivnosti je koreliran tako s povišanimi temperaturami kot tudi večjimi koncentracijami CO₂, medtem ko je zakasnen konec aktivnosti pripisan predvsem obogatitvi ozračja s CO₂ [47]. Tudi projekcije na osnovi podnebnih scenarijev kažejo, da bodo rastline v urbanih predelih imele v naslednjih desetletjih podaljšano fotosintetsko sezono.

Vpliv urbanizacije, in s tem MTO, na okoliško vegetacijo sega iz mestnih jeder nekaj kilometrov daleč, razlike pa so precejšnje glede na gostoto poselitve in razmerje med pozidanimi, zelenimi in vodnimi površinami v mestu. Za večje število kitajskih urbanih regij sega vpliv MTO na fenologijo 6 km iz centra mest [26], za različno velika severno ameriška mesta v povprečju 11 km [1]; Melaas idr. (2016) [34] so ugotovili vpliv MTO na fenologijo celo 15 km daleč iz mestnega jedra.

Za ovrednotenje vpliva temperature na razvoj rastlin obstajajo številne metode, med katerimi zelo pogosto uporabljajo metodo termalnega časa (*ang. Growing Degree Days-GDD*). Le-ta temelji na kumulativnem učinku dnevnih temperatur zraka v daljšem časovnem obdobju in razloži večji del variabilnosti v času razvojnih faz rastlin. Rastline za prehod iz ene razvojne faze do druge potrebujejo določeno količino toplote, ki se ne spreminja, zmožek temperature in časa za celoten razvoj v rastni dobi je vedno enak. Seštevek toplotnih enot v fenologiji izražamo s termalnim časom (GDD), to je akumuliran zmožek temperature in časa nad temperaturo praga, pri kateri se prične razvoj rastlin [48].

Zaradi višjih temperatur zraka se spreminja tudi količina toplote, ki je na voljo rastlinam za njihov razvoj [49]. Trend GDD je v Evropi pozitiven [50], še posebej izrazit je v Sredozemlju [51]. Urbana območja z MTO se v zadnjem času soočajo s spremembami GDD, kar so potrdili Krehbiel idr. (2017) [1] za večje število mest v ZDA, kjer je MTO v povprečju vplival na okrog 600 °D večji GDD nad pragom 0 °C. Ob povprečni dnevni toplotni akumulaciji 20 enot, je to pomenilo 30 dni razlike v trajanju rastne sezone. Grigorieva idr. (2010) [52] so ugotovili močno povezanost med mesečnimi temperaturami zraka od maja do septembra ter GDD, kar pomeni, da lahko uporabimo mesečne temperature kot nadomestne (proxy) podatke za izračun GDD. V tej raziskavi je trend GDD za rastno sezono nad pragom 0 °C, 5 °C 10 °C in 15 °C značilno pozitiven in največji za prag 0 °C. Večje spremembe termalnega časa nad nižjim pragom so potrdili za zadnja desetletja tudi nekateri drugi raziskovalci [49], [53]. Termalni čas so uporabili pri študijah vpliva podnebnih sprememb na spremenjene toplotne razmere [54]. Raziskave kažejo [55], da bo segrevanje pospešilo rast rastlin, na ta način se bo trajanje nekaterih fenostopenj skrajšalo, kar moramo upoštevati pri strategijah prilagajanja na podnebne spremembe. Glede na hiter tempo urbanizacije in segrevanje ozračja je razumevanje sprememb fenološkega razvoja v prihodnosti zelo pomembno, če želimo učinkovito upravljati mestne zelene površine.

Namen našega dela je proučiti spremenljivost:

- mesečnih in letne temperature zraka,
- začetka, konca in dolžine rastne sezone,
- termalnega časa nad temperaturami praga 0 °C, 5 °C in 10 °C

ter povezanost povprečne temperature zraka za rastno sezono in termalnega časa v Mariboru za obdobje 1971–2020.

2 Metode dela

Za izračun dolžine rastne sezone (RS) in termalnega časa (GDD) smo uporabili dnevne maksimalne in minimalne temperature zraka za postajo Maribor Tabor (275 m, 46,5394; 15,6450) za obdobje 1971–2019; za obdobje jan.–dec. 2020 pa postajo Maribor Vrbanski plato (279 m, 46,5678; 15,6260), saj se je lokacija opazovalne postaje v okviru ARSO meteorološke mreže spremenila [56]. Povprečno dnevno temperaturo smo izračunali kot $T_{pov} = (T_{max} + T_{min}) / 2$.

V obdobju od 1. 1. 1971 do 31. 12. 2020 za nekatera krajša obdobja podatkov o temperaturi zraka v arhivu ARSO ni na voljo (12.–16. 9. 2012, 26. 9. 2012, 20. 1.–31. 1. 2016). Manjkajoče podatke smo pridobili iz slovenske baze rekonstruiranih dnevnih meteoroloških podatkov SLOCLIM [57] na mreži 1 x 1 km, uporabili smo točko s koordinatami 278m, 46,5389; 15,6466. Mreža vsebuje dnevne maksimalne in minimalne temperature zraka, iz katerih smo izračunali povprečne dnevne vrednosti. Podatki so prosto dostopni v repozitoriju Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.410854>) in preko www.sloclim.eu.

Za izračun dolžine letnega rastnega obdobja smo uporabili metodologijo, ki jo uporablja Agencija Republike Slovenije za okolje [58] in temelji na metodologiji ekspertne skupine za zaznavanje podnebnih sprememb in indekse ETCCDI (*ang. Expert Team on Climate Change Detection and Indices*) [59]. Dolžina rastne sezone je eden izmed standardnih podnebnih indeksov, ki ga pogosto uporabljajo za prikazovanje temperaturnih trendov.

Dolžina letne rastne sezone je število dni od nastopa spomladanskega in jesenskega temperaturnega praga 5 °C (TP5) in je definirana z meteorološkega vidika kot obdobje znotraj temperaturnih pragov.

Spomladanski temperaturni prag je prvi dan, ko je spomladi vsaj 6 dni zaporedoma povprečna temperatura zraka višja od TP5, po tem datumu pa povprečna dnevna temperatura zraka najmanj 6 zaporednih ni več nižja od TP5, s čimer izključimo vsaj 6 dni dolge zgodnje otoplitve v zimskem času.

Jesenski temperaturni prag je prvi dan, ko je jeseni povprečna dnevna temperatura zraka vsaj 6 dni zaporedoma nižja od TP5.

Termalni čas smo izračunali kot razliko med povprečno dnevno temperaturo (T_d) in temperaturo praga (TP) za obdobje letne rastne sezone od $i = 1$ do $i = n$. Akumuliran termalni čas izrazimo kot stopinjske dneve (GDD – growing degree days), pri čemer je en stopinjski dan (°D) dosežen, ko je en dan (24 ur) s temperaturo višjo za eno stopinjo od temperature praga [56].

$$GDD = \sum_{i=1}^n T_d - TP$$

Termalni čas smo izračunali za tri temperaturne prage: 0 °C (TP0), 5 °C (TP5) in 10 °C (TP10), ki se najpogosteje uporabljajo pri analizah toplotnih razmer [52], [56], [60]: 0 °C, ki označuje obdobje brez zmrzali, 5 °C, ki označuje začetek aktivne rasti večine gojenih in negojenih rastlin zmernih geografskih širin, ter 10 °C, ki označuje začetek najaktivnejšega dela rastne dobe.

Spremenljivost temperaturnih razmer v obravnavanem obdobju smo analizirali za tri desetletna obdobja: 1971–2000 (P71-00), 1981–2010 (P81-10) in 1992–2020 (P91-20). Trende smo izračunali z linearno regresijo in za statistično značilnost uporabili Mann-Kendallov statistični test, stopnja značilnosti 0,05.

Ob izračunih za lokacijo meteorološke postaje Maribor Tabor smo za rastno sezono uporabili bazo podatkov SLOCLIM [57] za izračun GDD za TP5 in TP10 v programu ClimPACT [61] za širše območje Maribora, upravno-teritorialno enoto Maribor [62]. Pri tem smo uporabili za dolžino rastne sezone poenostavljeno metodo, ki jo pogosto uporabljajo v klimatoloških analizah [52], [63], to je konstantno obdobje tople polovice leta (april–september). Za izračun in izris kart GDD smo uporabili naslednje korake:

- Povezava koordinat točk znotraj upravno-teritorialne enote Maribor s koordinatami iz baze podatkov SLOCLIM.
- Določitev točk na študijskem območju in izračun za vsako točko posebej s programom ClimPACT za TP5 in TP10.
- Interpolacija točk z vrednostmi GDD v ArcMap z orodjem IDW (Inverse Distance Weight) [64] in prikaz po ustreznih razredih za obdobja P71-00, P81-10 in P91-20.

Ker baza SLOCLIM vsebuje temperaturne podatke samo do vključno leta 2018, je zadnje prikazano obdobje na kartah GDD krajše (1991–2018).

3 Rezultati z diskusijo

3.1 Temperatura zraka

Na dolžino RS in GDD v posameznem letu najbolj vplivajo temperature zraka. V proučevanem obdobju 1971–2020 je bila povprečna letna temperatura zraka v Mariboru 10,9 °C. Od prvega obdobja P71-00 do zadnjega obdobja P91-20 je z 10,5 °C narasla na 11,4 °C, trend pa je statistično značilen in znaša 0,46 °C/10 let (Preglednica 1, Slika 1). V obravnavanem obdobju so bila tri najtoplejša leta 2019 (12,6 °C), 2014 (12,4 °C) in 2018 (12,3 °C). Najhladnejša so bila leta 1978 in 1980 (9,3 °C) in 1985 (9,6 °C). Po letu 1999 (v obdobju 2000–2020) so bila le štiri leta z letnim povprečjem, nižjim od 10,9 °C, to so bila leta 2004, 2005, 2006 in 2010. V zadnjem desetletju so bila vsa leta nadpovprečno topla. Ugotovljene spremembe temperature zraka so v skladu s številnimi raziskavami drugod po svetu [65], pri čemer so trendi za Evropo in Slovenijo enaki [66], [67].

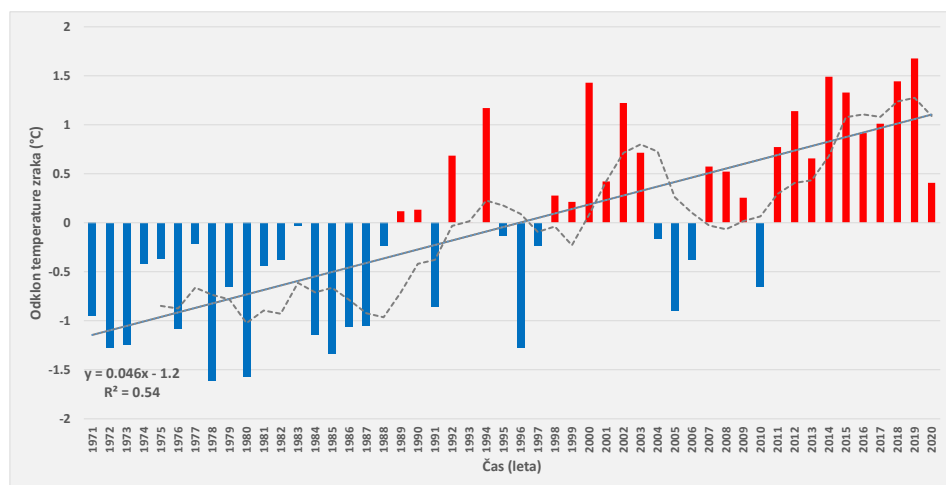
Pri obravnavi rastne sezone (RS) in potrebnega termalnega časa za nastop fenofaz je pomembno poznati tudi temperaturne razmere posameznih letnih časov. Zima (december–februar) ima za celotno obravnavano obdobje v Mariboru povprečno temperaturo zraka 1,3 °C; pomlad (marec–maj) 11,0 °C; poletje (junij–avgust) 20,2 °C in jesen 10,9 °C (september–november). Povprečna temperatura zraka vseh letnih časov je v zadnjem obdobju P91-20 višja kot v začetnem obdobju P71-00 in v celotnem obdobju P71-2020 (Slika 2). Najtoplejše pomladi v obravnavanem obdobju so bile v letih 2000 (13,1 °C), 2014 in 2017 (12,7 °C) in najhladnejši dve v letih 1987 in 1980, ko je bila povprečna pomladna temperatura le 8,6 °C. Zelo vroča so bila poletja 2003 (23,8 °C), 2019 (22,4 °C) ter 2012 in 2017 (22,3 °C). Najhladnejše je bilo poletje 1978, ko je bila temperatura kar za 6 °C nižja kot v letu 2003. Povprečna temperatura najtoplejših jeseni znaša 13,1 °C (2000, 2014 in 2019), najhladnejših dveh v letih 1972 in 1978 pa 9,0 °C in 9,1 °C. Zelo velike so razlike pri zimskih temperaturah. Tri najtoplejše zime so bile 1998, 2007 (4,2 °C) in 2020 (3,6 °C) in najhladnejša zima 1985, ko je bila povprečna temperatura kar -2,3 °C. Primerjava s podobnimi analizami za Maribor [68] kaže, da se predvsem pri ekstremno visokih temperaturah spremembe dogajajo pogostejše v zadnjih letih. Kar se tiče razlike med najvišjo in najnižjo povprečno sezonsko temperaturo, je ta največja pozimi in znaša 6,5 °C, nekoliko manjša je poleti (6 °C), razlika med najtoplejšo in najhladnejšo pomladjo je 4,5 °C in za jesen 4,1 °C.

Preglednica 1: Povprečne mesečne in letne temperature za proučevana obdobja ter linearni trend za obdobje 1971–2020 (°C/10 let) za postajo Maribor, **značilen trend pri $p < 0,05$

	P71-2020	P71-00	P81-10	P91-20	trend P71-2020 (°C/10 let)
jan	0,3	0,0	0,1	0,7	0,32
feb	2,3	2,1	2,0	2,7	0,30
mar	6,5	6,2	6,4	6,9	0,35**
apr	10,9	10,3	10,9	11,6	0,69**
maj	15,5	15,2	15,8	16,0	0,32**
jun	19,0	18,3	18,9	19,8	0,65**
jul	20,9	20,3	21,0	21,5	0,56**
avg	20,5	20,0	20,6	21,3	0,61**
sep	16,2	16,0	16,2	16,5	0,34**
okt	11,2	10,8	11,4	11,6	0,47**
nov	5,6	4,9	5,4	6,3	0,65**
dec	1,4	1,1	1,0	1,4	0,25
leto	10,9	10,5	10,8	11,4	0,46**

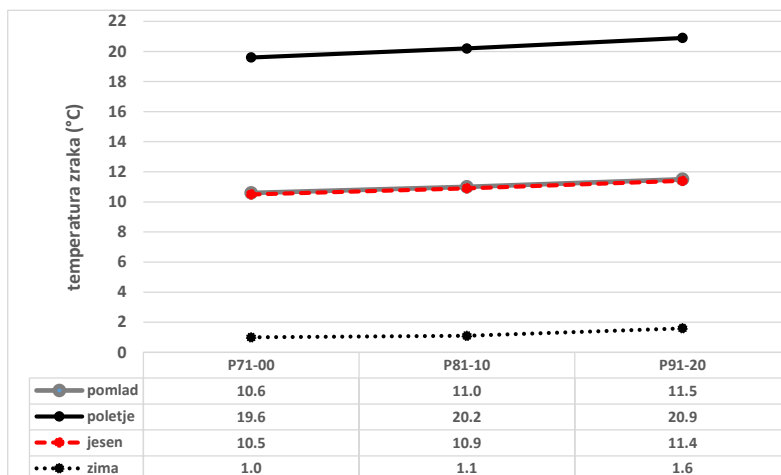
Vir podatkov: [56], [57].

Trend povprečne temperature zraka je v vseh mesecih pozitiven, vendar v zimskih mesecih statistično neznačilen. Povprečna temperatura zraka je v Mariboru v obdobju 1971–2020 naraščala najbolj poleti s trendom $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{desetletje}$. Največji trend temperature so za poletje za območje celotne Slovenije ugotovili že v predhodnih raziskavah za obdobje 1961–2011 [67], da poletne temperature zraka v Mariboru naraščajo, pa kažeta tudi raziskavi Žiberna in Ivajnšič (2018) [11] ter Nadbath (2019) [68]. Za zimske mesece je trend sicer pozitiven ($0,29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$), vendar statistično neznačilen. Značilno so se segrele tudi pomladi, izrazito mesec april, za katerega trend temperature zraka znaša $0,69\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{desetletje}$. Zelo podoben trend kot za pomlad smo ugotovili tudi za jesenske mesece ($0,48\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$). Vertačnik idr. (2013) [67], ki so proučevali podnebno spremenljivost Slovenije za obdobje 1961–2011, so sicer ugotovili tudi za jesen pozitivne trende povprečne temperature zraka, ki pa niso bili statistično značilni, znašali pa so okoli $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$ za območje vzhodne Slovenije (Starše, Veliki Dolenci, Murska Sobota Rakičan), za postajo Maribor Tabor trend ni podan.



Slika 1: Odklon letne povprečne temperature zraka od dolgoletnega povprečja 1971–2020, pripadajoč linearni trend** ($p < 0,05$) ter 5-letno drseče povprečje za postajo Maribor

Vir podatkov: [56], [57].



Slika 2: Povprečna temperatura zraka po letnih časih in po obdobjih, Maribor
Vir podatkov: [56], [57].

3.2 Začetek, konec in dolžina rastne sezone

Spremembe temperaturnih razmer neposredno vplivajo tudi na začetek, konec in dolžino rastne sezone (RS), pri čemer je začetek in konec RS definiran s temperaturnim pragom $TP = 5^{\circ}\text{C}$. Za celotno obravnavano obdobje se je RS začela v povprečju 8. marca in se končala 20. novembra, dolžina je znašala 257 dni (Preglednica 2). Spremenljivost med leti je zelo velika, standardni odklon (SD) za začetek RS znaša kar 17 dni in za konec okrog 13 dni. Glede na to je razumljiva tudi velika spremenljivost trajanja RS, SD znaša 21 dni, dolžina RS kaže veliko nehomogenost in razpršenost (Slika 3), na kar so že opozorile predhodne raziskave za Slovenijo [60].

Preglednica 2: Začetek, konec in dolžina rastne sezone s pripadajočimi standardnimi odkloni, podano kot zaporedni dan v letu in kot datum

Obdobje	Začetek RS	Konec RS	Dolžina RS (število dni)
1971–2020	67 (8. 3.) $\pm$ 17,0	324 (20. 11.) $\pm$ 13,3	257 $\pm$ 21,3
P71-00	69 (10. 3.) $\pm$ 16,6	322 (18. 11.) $\pm$ 14,4	253 $\pm$ 20,9
P81-10	68 (9. 3.) $\pm$ 17,5	324 (20. 11.) $\pm$ 14,9	256 $\pm$ 21,7
P91-20	65 (6. 3.) $\pm$ 17,5	325 (21. 11.) $\pm$ 13,1	260 $\pm$ 22,4

Vir podatkov: [56], [57].

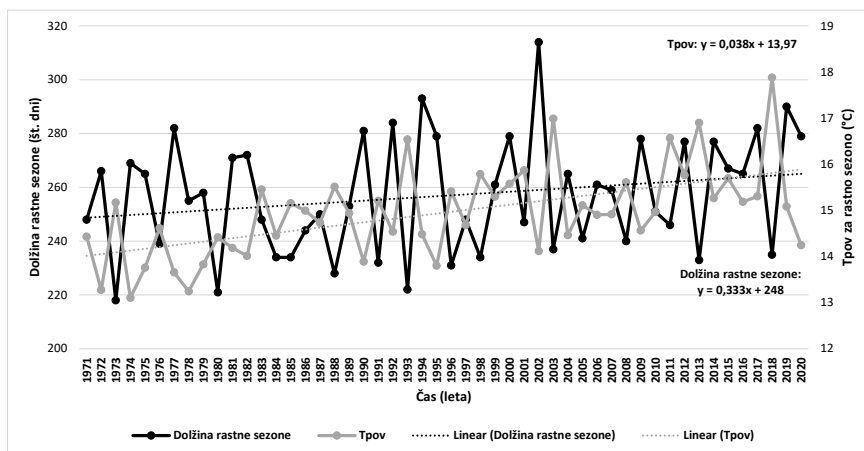
	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	avg	sep	okt	nov	dec	DRS
1971													248
1972													266
1973													218
1974													269
1975													265
1976													239
1977													282
1978													255
1979													258
1980													221
1981													271
1982													272
1983													248
1984													234
1985													234
1986													244
1987													250
1988													228
1989													253
1990													281
1991													232
1992													284
1993													222
1994													293
1995													279
1996													231
1997													248
1998													234
1999													261
2000													279
2001													247
2002													314
2003													237
2004													265
2005													241
2006													261
2007													259
2008													240
2009													278
2010													251
2011													246
2012													277
2013													233
2014													277
2015													267
2016													265
2017													282
2018													235
2019													290
2020													279

Slika 3: Dolžina rastne sezone v Mariboru v posameznih letih, prikazana s pričetkom in koncem po dekadah, v zadnjem stolpcu (DRS) je zapisana dolžina rastne sezone v številu dni

Vir podatkov: [56], [57].

V vseh treh obdobjih je bil najzgodnejši začetek RS že v mesecu januarju, v P71-00 28. januarja, v P81-10 in P91-20 pa 27. januarja. Najkasnejši začetek RS sovпада za vsa tri obdobja na 6. april, razpon med najzgodnejšim in najkasnejšim začetkom RS znaša več kot dva meseca (60 dni). Podoben razpon je značilen za konec RS, ki se je v letih 1973, 1991 in 2003 končala že 23. oktobra, v letu 1982 pa šele tik pred iztekom koledarskega leta, 22. decembra (60 dni kasneje).

Dolžina RS se je v proučevanem obdobju podaljšala za sedem dni, trend znaša 1,4 dni/10 let ($p < 0,05$), sprememba pa je posledica tako zgodnejšega začetka (4 dni) kot poznejšega zaključka RS (3 dni). Podaljšanje RS so ugotovili tudi za ostale lokacije po Sloveniji, pri čemer obstajajo precejšnje razlike med posameznimi kraji. Za primerjalni obdobji 1961–1990 in 1991–2020 [60] je za Bilje pri Novi Gorici 6 dni daljša RS, za Mursko Soboto 10 dni, za Ljubljano pa kar 17 dni. Prav tako so različne mednarodne raziskave za Evropo potrdile podaljševanje letne rastne sezone [50]. Število dni s pozitivno minimalno temperaturo zraka, to so dnevi brez zmrzali, eden izmed načinov definiranja rastne sezone, je pokazala, da se je dolžina tega obdobja po letu 1992 podaljšala za okrog 10 dni. Največja sprememba (nad 0,8 dni/leto) je v severni in vzhodni Evropi, nekoliko manjša (0,6-0,8 dni/leto) pa v zahodnih in južnih predelih Evrope, pri čemer so spremembe najmanjše v Sredozemlju [69]. Za Kitajsko so Yin idr. (2019) [53] ugotovili, da so pomladi v obdobju 1960–2011 zgodnejše za 5–7 dni in jeseni kasnejše za 4–6 dni. Na Sliki 4 je prikazana povezanost med povprečno temperaturo RS (T_{pov}) in dolžino RS v Mariboru, gre za obratno sorazmernost, korelacijski koeficient znaša -0,46. V letih z nižjimi temperaturami zraka je ponavadi RS daljša in obratno. Povezanost povprečnih temperatur in dolžine RS nakazuje možnost uporabe T_{pov} kot proxy podatka za dolžino RS ali GDD v rastni sezoni [52], hkrati je to tudi možen način projekcij sprememb dolžine RS ob projekcijah sprememb temperature.



Slika 4: Obratna sorazmernost hodov povprečne temperature rastne sezone (Tpov) in dolžine rastne sezone v obdobju 1971–2020 v Mariboru, $r = -0,46^{**}$ ($p < 0,05$)

Vir podatkov: [56], [57].

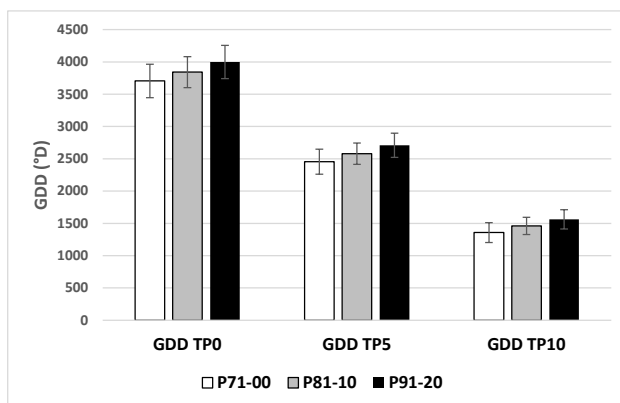
3.3 Termalni čas za lokacijo Maribor Tabor

Analizo sprememb termalnega časa (GDD) smo naredili za tri temperaturne prage. V Preglednici 3 in na Sliki 5 so za proučevana obdobja podane povprečne vrednosti GDD in njihova variabilnost. GDD je za vse tri TP v zadnjem obdobju večji, relativno povečanje je največje pri TP10, znaša 15 % (206 °D), za TP5 se je vsota povečala za 10 % (254 °D) in za TP0 za 8 % (294 °D). Bolj informativen kot SD je CV, koeficient variabilnosti, ki pokaže relativno variabilnost (v %) in je izračunan kot razmerje med SD in aritmetično sredino. CV se povečuje od nižje TP (za 0 °C 6–7 %) do višje TP (za 10 °C 9–11 %), kar kaže na nezanesljivost toplotnih virov v poletnem času. Naši rezultati potrjujejo ugotovitve glede povečanja termalnega časa v zadnjem obdobju ter razlik glede spremenljivosti nad različnimi TP v številnih drugih raziskavah za Evropo [50], [51], [54] in ostala območja severne poloble [1], [52], [53].

Preglednica 3: Termalni čas (GDD v °D) s pripadajočimi standardnimi odkloni (SD v °D) in koeficienti variabilnosti (CV v %) za tri proučevana obdobja

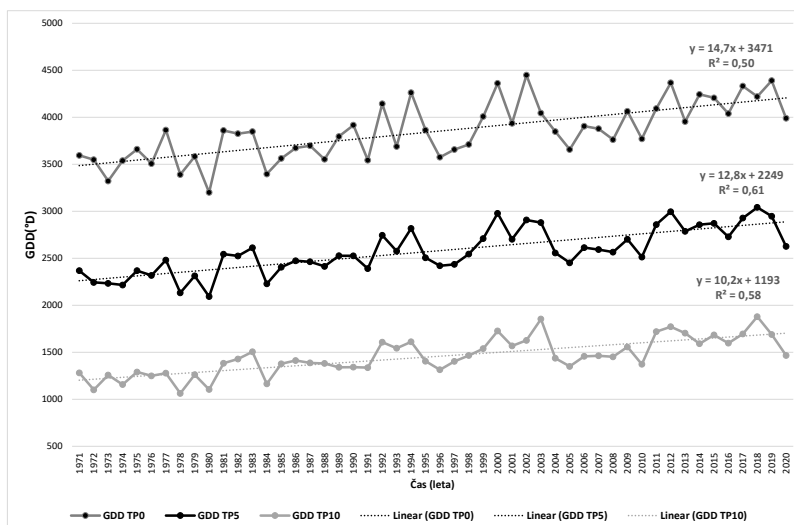
Obdobje	TP = 0 °C		TP = 5 °C		TP = 10 °C	
	GDD±SD	CV	GDD±SD	CV	GDD±SD	CV
P71-00	3705±258	7,0	2454±194	7,9	1357±155	11,4
P81-10	3842±241	6,3	2578±165	6,4	1460±134	9,2
P91-20	3999±256	6,4	2708±187	6,9	1563±150	9,6

Vir podatkov: [56], [57].



Slika 5: Termalni čas (GDD) s pripadajočimi SD za TP0, TP5 in TP10 za tri proučevana obdobja v Mariboru

Vir podatkov: [56], [57].



Slika 6: Časovna porazdelitev termalnega časa (GDD) pri različnih TP in pripadajoči linearni trendi v Mariboru za obdobje 1971–2020, trendi so statistično značilni ($p < 0,05$)**

Vir podatkov: [56], [57].

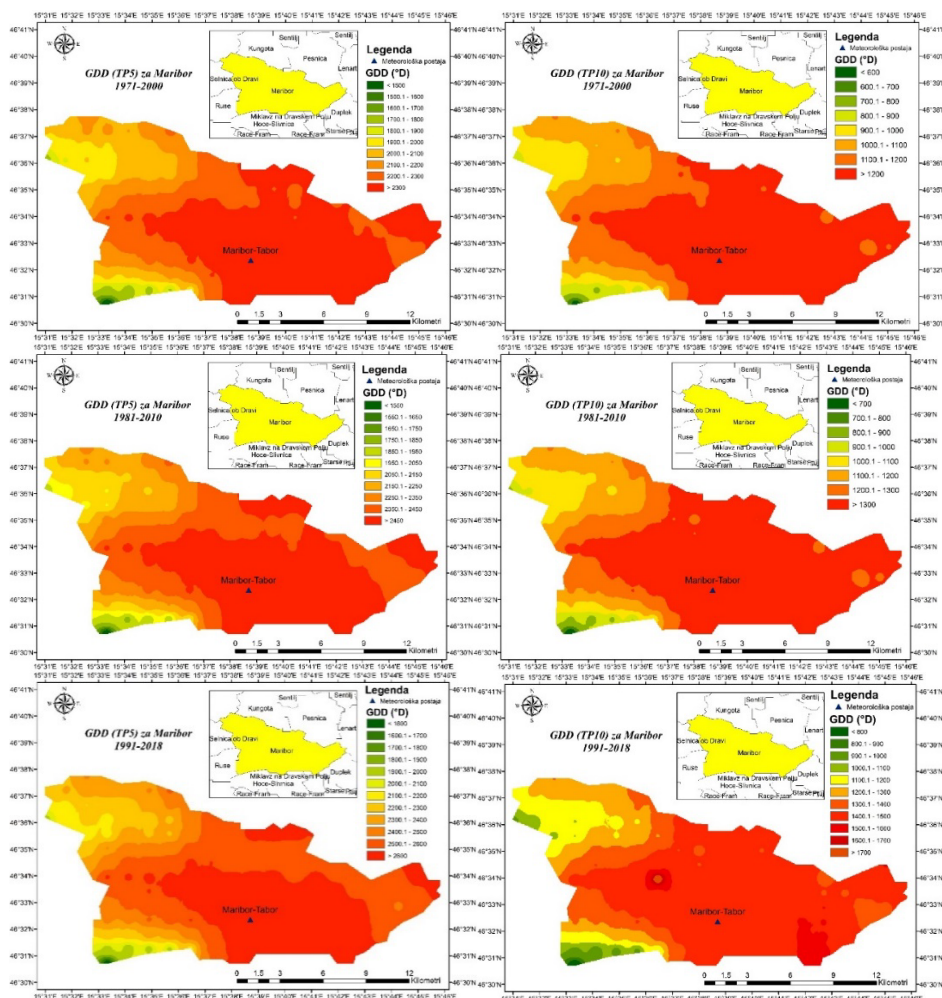
Trend povečanja GDD znaša za obdobje 1971-2020 okrog $147\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$ za TP0, $128\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$ za TP5 in $102\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$ za TP10, trendi za vse prage so statistično značilni pri $p < 0,05$ (Slika 6). Pri nižjih TP so trendi višji, kar pomeni, da so spremembe toplotnih razmer večje v obdobju nižjih temperatur (obdobje brez zmrzali) kot v poletnih mesecih, kar so ugotovili tudi nekateri drugi raziskovalci [53]. Wypychova idr. (2017) [50] so tako npr. za Poljsko ugotovili za obdobje 1951–2020 trend $60\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$ za TP0, za TP10 pa le $28\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$, zelo podobne rezultate je pokazala tudi raziskava Grigorieve idr. (2010) [52] za območje Rusije in Daljnega vzhoda. Povečanje GDD je seveda lahko tudi neposredna posledica segrevanja mest in toplotnega otoka, kar so prav tako ovrednotili v nekaterih raziskavah. Za nekatera severnoameriška mesta so Krehbiel idr. (2017) [1] ugotovili, da je v centrih mest s toplotnim otokom okrog $670\text{ }^{\circ}\text{D}$ višji GDD nad TP0 in vpliv je opazen do 11 km izven urbanih središč.

3.4 Termalni čas za širše območje Maribora

Za širše območje Maribora je na Sliki 7 prikazan GDD za TP5 in TP10 za obdobje 1. april–30. september za vsa tri obdobja, vsi temperaturni podatki so iz SLOCLIM baze [57].

Ker so v bazi SLOCLIM rekonstruirani meteorološki podatki le do l. 2018, je zadnje prikazano obdobje na Sliki 7 1991-2018 (P91-18). Vidne so razlike v GDD med širšim območjem mesta Maribor in redkeje poseljenimi območji občine. Pri TP5 je razlika med najbolj poseljenimi predeli Maribora in nepozidanimi območji opazna v velikosti $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{D}$ približno do oddaljenosti 5 km iz centra mesta. Akumulacija toplote v mestnih središčih je seveda vezana na velikost mesta. Tako so Krehbiel idr. (2017) [1] ugotovili, da je bil GDD nad TP0 skoraj $700\text{ }^{\circ}\text{D}$ višji v centru mesta glede na nepozidano okolico. Primerjava med posameznimi obdobji za širše območje Maribora prav tako kaže, da vrednosti GDD pri TP5 naraščajo, v obdobju P71-00 je zgornji razred določen z vrednostmi $>2300\text{ }^{\circ}\text{D}$, v naslednjem obdobju z vrednostmi $>2450\text{ }^{\circ}\text{D}$ in v obdobju P91-18 z vrednostmi $>2600\text{ }^{\circ}\text{D}$. Tudi pri TP10 so v zadnjem obdobju vrednosti GDD višje, meje zgornjih razredov pa so v P71-00 $>1200\text{ }^{\circ}\text{D}$, v P81-10 $>1300\text{ }^{\circ}\text{D}$ in v P91-18 celo nad $1.700\text{ }^{\circ}\text{D}$. Izračunane vrednosti GDD na osnovi rekonstruiranih temperatur v mreži $1\text{ x }1\text{ km}$ iz SLOCLIM baze [57] se zelo dobro ujemajo z izračuni GDD za postajo Maribor Tabor (Preglednica 3, Slika 5), za katero smo uporabili arhiv ARSO [56]. Kljub temu da v okviru ARSO

deluje veliko meteoroloških postaj, pa le-te ne zajamejo vseh območij, saj so nekatera slabše pokrita z meritvami, drugje pa bi zaradi raznolikoga površja ali specifične mikroklimе potrebovali dodatne meteorološke podatke. Baza SLOCLIM omogoča, da pridobimo lokalne meteorološke podatke v neposredni bližini naše raziskave in kot taka tudi odpira možnosti pri raziskavah toplotnih razmer v urbanih in neurbanih predelih, kjer potrebujemo podatke visoke časovne in prostorske ločljivosti.



Slika 6: GDD za TP5 (levo) in TP10 (desno) za obdobje 1.april-30.september za širše območje Maribora za obdobja P71-00, P81-10 in P91-18

Vir podatkov: [57].

4 Zaključek

Analiza temperaturnih podatkov za Maribor za obdobje 1971–2020 kaže, da so se temperaturne razmere v rastni sezoni značilno spremenile. Trend povprečne letne temperature zraka znaša $0,46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$ in največji je v poletnem času ($0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ let}$). Od vključno leta 2011 so bila vsa leta nadpovprečno topla. Dolžina RS se je v proučevanem obdobju podaljšala za sedem dni, značilna je zelo velika razpršenost ($\text{SD} = 21\text{ dni}$). Trend znaša $1,4\text{ dni}/10\text{ let}$ ($p < 0,05$), sprememba je posledica tako zgodnejšega začetka (4 dni) kot poznejšega zaključka RS (3 dni). Spremenila se je tudi količina akumulirane toplote, ki je na voljo rastlinam v času njihove rasti. Trend povečanja GDD znaša za obdobje 1971–2020 okrog $147\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$ za TP0, $128\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$ za TP5 in $102\text{ }^{\circ}\text{D}/10\text{ let}$ za TP10. Pri nižjih TP so trendi višji, kar pomeni, da so spremembe toplotnih razmer večje v obdobju nižjih temperatur kot v poletnih mesecih. Primerjava izračunanega GDD za lokacijo Maribor Tabor s podatki arhiva ARSO in GDD za širšo lokacijo Maribora z rekonstruiranimi temperaturnimi podatki iz baze SLOCLIM je pokazala dobro ujemanje. SLOCLIM baza tako omogoča, da pridobimo lokalne meteorološke podatke v neposredni bližini naše raziskave in kot taka tudi odpira možnosti pri raziskavah toplotnih razmer v urbanih in neurbanih predelih, kjer potrebujemo podatke visoke časovne in prostorske ločljivosti.

Projekcije podnebnih sprememb zelo enotno kažejo, da se bodo temperature površja planeta v prihodnje še zviševale [65], kar bo vplivalo na nadaljnje spremembe rastnih razmer, dolžine rastne sezone in termalnega časa [54], [55]. V okviru evropskega projekta EURO-CORDEX (www.euro-cordex.net) so bili pripravljene scenariji prihodnjih podnebnih sprememb, značilni poteki vsebnosti (*ang. Representative Concentration Pathways -RCP*) glede na skupni sevalni prispevek leta 2100. Zmerno optimističen scenarij RCP4.5 kaže, da bo povprečna temperatura obdobja 2041–2070 v Sloveniji na letni ravni za $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ višja v primerjavi s povprečjem 1981–2010, dvig bo dokaj enakomeren poleti, jeseni in pozimi, nekoliko manj izražen pa pomladi [58]. Spremenjene toplotne razmere bodo omogočale zgodnejši fenološki razvoj pomladi in zamik rastne sezone v pozno jesensko ali celo zimsko obdobje, kar bo dolgoročno vplivalo na biološko raznovrstnost. Vse te spremembe moramo upoštevati pri strategiji prilagajanja na podnebne spremembe, kjer bo pri povečevanju odpornosti in prilagoditvenih sposobnosti Slovenije pomembno področje tudi mestna klima in zmanjšanje vpliva mestnih toplotnih otokov.

Literatura

- [1] C. Krehbiel, X. Zhang, in G. Henebry, „Impacts of Thermal Time on Land Surface Phenology in Urban Areas“, *Remote Sensing*, let. 9, št. 5, str. 499, maj 2017, doi: 10.3390/rs9050499.
- [2] G. Wohlfahrt, E. Tomelleri, in A. Hammerle, „The urban imprint on plant phenology“, *Nat Ecol Evol*, let. 3, št. 12, str. 1668–1674, dec. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-1017-9.
- [3] J. Škvareninová idr., „Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment“, *Moravian Geographical Reports*, let. 25, št. 4, str. 282–290, dec. 2017, doi: 10.1515/mgr-2017-0024.
- [4] K. Cerar, „Opazovanje mestnega toplotnega otoka“, Diplomsko naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2020. [Na spletu]. Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=120606>
- [5] B. Komac idr., „Urban Heat Island in the Ljubljana City“, v Musco F., *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*, F. Musco, Ur. Cham: Springer International Publishing, 2016, str. 323–344. doi: 10.1007/978-3-319-10425-6_12.
- [6] Ž. Vrečko, „Značilnosti mestnega toplotnega otoka v severozahodnem delu Ljubljane pozimi 2020/2021“, Diplomsko naloga, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=131890>
- [7] I. Žiberna idr., „The Impact of Climate Change on Urban Thermal Environment Dynamics“, *Atmosphere*, let. 12, št. 9, str. 1159, sep. 2021, doi: 10.3390/atmos12091159.
- [8] M. Klemenčič, „Uporaba daljinsko zaznanih posnetkov pri proučevanju spreminjanja mestnega toplotnega otoka v Ljubljani“, Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 2016.
- [9] MOL, „Pojav mestnega toplotnega otoka“, *Mestna občina Ljubljana*, 7. februar 2014. <https://www.ljubljana.si/sl/aktualno/pojav-mestnega-toplotnega-otoka/> (pridobljeno 11. maj 2017).
- [10] B. Komac in R. Ciglič, „Urban heat island atlas: A web tool for the determination and mitigation of urban heat island effects“, *Geographia Polonica*, let. 87, št. 4, str. 587–591, 2014.
- [11] I. Žiberna in D. Ivajnšič, „Vročinski valovi v Mariboru v obdobju 1961-2018“, *Revija za geografijo-Journal for Geography*, let. 13, št. 2, str. 73–90, 2018.
- [12] D. Ivajnšič, „Toplotni otok Ljutomera“, *Geografski obzornik*, let. 2, št. 57, str. 14–21, 2010.
- [13] T. Malenšek, „Mestni toplotni otok Novega mesta pozimi 2019/2020“, Zaključna seminarska naloga, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 2020. [Na spletu]. Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=118630>
- [14] I. Žiberna, „Trendi temperatur zraka v Mariboru kot posledica razvoja mestnega toplotnega otoka“, *Revija za geografijo*, let. 1, št. 1, str. 81–98, 2006.
- [15] M. Nastran, M. Kobal, in K. Eler, „Urban heat islands in relation to green land use in European cities“, *Urban Forestry & Urban Greening*, let. 37, str. 33–41, jan. 2019, doi: 10.1016/j.ufug.2018.01.008.
- [16] H. Takebayashi in M. Moriyama, „Chapter 1 - Background and purpose“, v *Adaptation Measures for Urban Heat Islands*, Academic Press, Elsevier, 2020, str. 1–8. doi: 10.1016/B978-0-12-817624-5.00001-4.
- [17] T. Qiu, C. Song, Y. Zhang, H. Liu, in J. M. Vose, „Urbanization and climate change jointly shift land surface phenology in the northern mid-latitude large cities“, *Remote Sensing of Environment*, let. 236, str. 111477, jan. 2020, doi: 10.1016/j.rse.2019.111477.
- [18] C. Farrell, C. Szota, in S. K. Arndt, „Urban Plantings: ‘Living Laboratories’ for Climate Change Response“, *Trends in Plant Science*, let. 20, št. 10, str. 597–599, okt. 2015, doi: 10.1016/j.tplants.2015.08.006.
- [19] G. Villalobos-Jiménez in C. Hassall, „Effects of the urban heat island on the phenology of Odonata in London, UK“, *Int J Biometeorol*, let. 61, št. 7, str. 1337–1346, jul. 2017, doi: 10.1007/s00484-017-1311-7.
- [20] S. Jochner in A. Menzel, „Urban phenological studies – Past, present, future“, *Environ. Pollut.*, let. 203, str. 250–261, avg. 2015, doi: 10.1016/j.envpol.2015.01.003.

- [21] L. Meng *idr.*, „Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States“, *PNAS*, let. 117, št. 8, str. 4228–4233, feb. 2020, doi: 10.1073/pnas.1911117117.
- [22] Q. Ren, C. He, Q. Huang, in Y. Zhou, „Urbanization impacts on vegetation phenology in China“, *Remote Sensing*, let. 10, št. 12, str. 1905, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/rs10121905>.
- [23] J. Tian, X. Zhu, J. Wu, M. Shen, in J. Chen, „Coarse-Resolution Satellite Images Overestimate Urbanization Effects on Vegetation Spring Phenology“, *Remote Sens.*, let. 12, št. 1, str. 117, jan. 2020, doi: 10.3390/rs12010117.
- [24] Y. Ji, J. Jin, W. Zhan, F. Guo, in T. Yan, „Quantification of Urban Heat Island-Induced Contribution to Advance in Spring Phenology: A Case Study in Hangzhou, China“, *Remote Sens.*, let. 13, št. 18, str. 3684, sep. 2021, doi: 10.3390/rs13183684.
- [25] A. Mimet, V. Pellissier, H. Quénol, R. Aguejdad, V. Dubreuil, in F. Roze, „Urbanisation induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus*“, *Int. J. Biometeorol.*, let. 53, št. 3, str. 287–298, 2009.
- [26] G. Han in J. Xu, „Land Surface Phenology and Land Surface Temperature Changes Along an Urban–Rural Gradient in Yangtze River Delta, China“, *Environmental Management*, let. 52, št. 1, str. 234–249, jul. 2013, doi: 10.1007/s00267-013-0097-6.
- [27] D. Meng, X. Liu, in C. Zhang, „Responses of plant phenology to urban heat island effects in Beijing“, *Chinese Journal of Ecology*, let. 40, št. 3, str. 844–854, 2021, doi: 10.13292/j.1000-4890.202103.029.
- [28] H. Ding, L. Xu, A. J. Elmore, in Y. Shi, „Vegetation phenology influenced by rapid urbanization of The Yangtze Delta region“, *Remote Sens.*, let. 12, št. 11, str. 1783, 2020.
- [29] W. Jia, S. Zhao, X. Zhang, S. Liu, G. M. Henebry, in L. Liu, „Urbanization imprint on land surface phenology: The urban–rural gradient analysis for Chinese cities“, *Global Change Biology*, let. 27, št. 12, str. 2895–2904, 2021.
- [30] D. Zhou, S. Zhao, L. Zhang, in S. Liu, „Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China’s 32 major cities“, *Remote Sens. Environ.*, let. 176, str. 272–281, apr. 2016, doi: 10.1016/j.rse.2016.02.010.
- [31] S.-J. Jeong, H. Park, C.-H. Ho, in J. Kim, „Impact of urbanization on spring and autumn phenology of deciduous trees in the Seoul Capital Area, South Korea“, *Int. J. Biometeorol.*, let. 63, št. 5, str. 627–637, 2019.
- [32] M. Dallimer, Z. Tang, K. J. Gaston, in Z. G. Davies, „The extent of shifts in vegetation phenology between rural and urban areas within a human-dominated region“, *Ecology and Evolution*, let. 6, št. 7, str. 1942–1953, 2016.
- [33] X. Li, Y. Zhou, G. R. Asrar, J. Mao, X. Li, in W. Li, „Response of vegetation phenology to urbanization in the conterminous United States“, *Glob. Change Biol.*, let. 23, št. 7, str. 2818–2830, 2017.
- [34] E. K. Melaas, J. A. Wang, D. L. Miller, in M. A. Friedl, „Interactions between urban vegetation and surface urban heat islands: a case study in the Boston metropolitan region“, *Environ. Res. Lett.*, let. 11, št. 5, str. 054020, maj 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/5/054020.
- [35] D. Li, B. J. Stucky, J. Deck, B. Baiser, in R. P. Guralnick, „The effect of urbanization on plant phenology depends on regional temperature“, *Nat Ecol Evol*, let. 3, št. 12, str. 1661–1667, dec. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-1004-1.
- [36] D. Li, B. J. Stucky, B. Baiser, in R. Guralnick, „Urbanization delays plant leaf senescence and extends growing season length in cold but not in warm areas of the Northern Hemisphere“, *Global Ecol Biogeogr.*, let. 31, str. 308–320, 2021.
- [37] S. Liang, P. Shi, in H. Li, „Urban spring phenology in the middle temperate zone of China: dynamics and influence factors“, *Int J Biometeorol.*, let. 60, št. 4, str. 531–544, apr. 2016, doi: 10.1007/s00484-015-1049-z.
- [38] S. M. Decina, P. H. Templer, in L. R. Huttyra, „Atmospheric Inputs of Nitrogen, Carbon, and Phosphorus across an Urban Area: Unaccounted Fluxes and Canopy Influences“, *Earth’s Future*, let. 6, št. 2, str. 134–148, feb. 2018, doi: 10.1002/2017EF000653.

- [39] C. M. Zohner, „Phenology and the city“, *Nat Ecol Evol*, let. 3, št. 12, str. 1618–1619, dec. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-1043-7.
- [40] Y. Chen, X. Wang, B. Jiang, N. Yang, in L. Li, „Pavement induced soil warming accelerates leaf budburst of ash trees“, *Urban Forestry & Urban Greening*, let. 16, str. 36–42, 2016.
- [41] Y. Chen, X. Wang, B. Jiang, in L. Li, „The leaf phenophase of deciduous species altered by land pavements“, *Int J Biometeorol*, let. 62, št. 6, str. 949–959, 2018, doi: 10.1007/s00484-018-1497-3.
- [42] I. D. Orzechowska-Szajda, R. K. Sobolewski, J. Lewandowska, P. Kowalska, in R. Kalbarczyk, „The Influence of Urban Conditions on the Phenology of *Aesculus hippocastanum* L. Using the Example of Wrocław (Poland)“, *Forests*, let. 11, št. 12, str. 1261, nov. 2020, doi: 10.3390/f11121261.
- [43] S. Jochner, I. Markevych, I. Beck, C. Traidl-Hoffmann, J. Heinrich, in A. Menzel, „The effects of short-and long-term air pollutants on plant phenology and leaf characteristics“, *Environ. Pollut.*, let. 206, str. 382–389, 2015.
- [44] D. S. Katz, A. Dzul, A. Kendel, in S. A. Batterman, „Effect of intra-urban temperature variation on tree flowering phenology, airborne pollen, and measurement error in epidemiological studies of allergenic pollen“, *Sci Total Environ.*, let. 653, str. 1213–1222, 2019.
- [45] S. C. Zipper, J. Schatz, A. Singh, C. J. Kucharik, P. A. Townsend, in S. P. Loheide, „Urban heat island impacts on plant phenology: intra-urban variability and response to land cover“, *Environ. Res. Lett.*, let. 11, št. 5, str. 054023, 2016.
- [46] L. Massetti, „Assessing the impact of street lighting on *Platanus x acerifolia* phenology“, *Urban For. Urban Green.*, let. 34, str. 71–77, 2018.
- [47] S. Wang *idr.*, „Urban–rural gradients reveal joint control of elevated CO₂ and temperature on extended photosynthetic seasons“, *Nat Ecol Evol*, let. 3, št. 7, str. 1076–1085, jul. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-0931-1.
- [48] Z. Črepinšek, L. Kajfež-Bogataj, in K. Bergant, „Modelling of weather variability effect on fitophenology“, *Ecological Modelling*, let. 194, str. 256–265, 2006.
- [49] L. Shang, J. Liao, S. Xie, Z. Tu, H. Liao, in K. Zhong, „Dynamic changes in the thermal growing season and their association with atmospheric circulation in China“, *Int J Biometeorol*, let. 66, št. 3, str. 545–558, mar. 2022, doi: 10.1007/s00484-021-02215-9.
- [50] A. Wypych, A. Sulikowska, Z. Ustrnul, in D. Czekierda, „Variability of growing degree days in Poland in response to ongoing climate changes in Europe“, *Int J Biometeorol*, let. 61, št. 1, str. 49–59, jan. 2017, doi: 10.1007/s00484-016-1190-3.
- [51] J. Spinoni, J. Vogt, in P. Barbosa, „European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011“, *Int J Climatol*, let. 35, št. 1, str. 25–36, 2015.
- [52] E. A. Grigorieva, A. Matzarakis, in C. R. De Freitas, „Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude“, *Clim Res.*, let. 42, št. 2, str. 143–154, 2010.
- [53] Y. Yin, H. Deng, in S. Wu, „Spatial-temporal variations in the thermal growing degree-days and season under climate warming in China during 1960–2011“, *Int J Biometeorol*, let. 63, št. 5, str. 649–658, maj 2019, doi: 10.1007/s00484-017-1417-y.
- [54] J. Spinoni *idr.*, „Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100“, *Int. J. Climatol*, let. 38, str. e191–e208, 2017, doi: 10.1002/joc.5362.
- [55] A. Sharma *idr.*, „Use of growing degree indicator for developing adaptive responses: A case study of cotton in Florida“, *Ecological Indicators*, let. 124, str. 107383, maj 2021, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107383.
- [56] ARSO, „Agencija RS za okolje“, *Arhiv meteoroloških podatkov*, 2022. <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (pridobljeno 22. februar 2022).
- [57] N. Škrk, M. de Luis, K. Čufar, Z. Črepinšek, L. Kajfež Bogataj, in R. Serrano-Notivol, „SLOCLIM: a high-resolution daily gridded precipitation and temperature dataset for Slovenia“, *Earth Syst. Sci. Data*, let. 13, št. 7, str. 3577–3592, jul. 2021, doi: 10.5194/essd-13-3577-2021.

- [58] ARSO, „Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja: Povzetek dejavnikov okolja z vplivom na kmetijstvo in gozdarstvo“, Agencija RS za okolje, Ljubljana, 2018. [Na spletu]. Dostopno na: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/change/>
- [59] A. M. G. Klein Tank, F. Zwiers, in X. Zhang, „Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, WMO/TD-1500, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72“, 2009.
- [60] A. Žust in Ž. Vlahovič, „Dolžina letne rastne dobe (PP06)“, Agencija RS za okolje, 2021. [Na spletu]. Dostopno na: <http://kazalci.arso.gov.si/sl/>
- [61] L. Alexander in N. Herold, *ClimPACT2 Indices and Software*. Sydney, Australia: The University of South Wales, 2016. Pridobljeno: 7. marec 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://github.com/ARCCSS-extremes/climpact2>
- [62] R. Hijmans in University of California, „The University of Texas at Austin, GeoData, University of Texas Libraries“, *Second-level Administrative Divisions, Slovenia, 2015 [map]*, 2015. <https://geodata.lib.utexas.edu/catalog/stanford-bp543mm1858> (pridobljeno 23. februar 2022).
- [63] ARSO, „Agencija RS za okolje“, *Agrometeorološka napoved*, 2022. <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/forecast2> (pridobljeno 16. marec 2022).
- [64] ESRI, *ArcGIS Pro*. Redlands, ZDA: Environmental Systems Resource Institute, 2022. Pridobljeno: 16. marec 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/geostatistical-analyst/idw.htm>
- [65] IPCC, „Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner H.O, Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (ured.)]“, Cambridge University Press, v tisku, 2022.
- [66] R. Bertalančič *idr.*, „Spremenljivost podnebja v Sloveniji“, ARSO, 2010.
- [67] G. Vertačnik, M. Dolinar, R. Bertalančič, M. Klančar, D. Dvoršek, in M. Nadbath, „Podnebna spreminljivost Slovenije. Glavne značilnosti gibanja temperature zraka v obdobju 1961–2011“, ARSO, 2013.
- [68] M. Nadbath, „Meteorološka postaja Maribor-Tabor“, *ARSO, Naše okolje*, str. 56–69, 2019.
- [69] EEA, „European Environmental Agency“, *Growing season for agricultural crops (CLIM 030)*, 2022. <https://www.eea.europa.eu/ims>