

Odziv urbanega drevja na podnebne razmere v mestnem okolju

Response of the Urban Trees to the Climate Conditions in Urban Environment

Borut SEVER BRGLEZ¹, Marinka BRGLEZ SEVER^{1,*}

Izvleček:

Sever Brglez, B., Brglez Sever, M.: Odziv urbanega drevja na podnebne razmere v mestnem okolju; Gozdarski vestnik, 78/2020, št. 7-8. V slovenščini z izvlečkom v angleščini, cit. lit. 94. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic.

V urbanem okolju drevesa strukturno in ekološko prispevajo h kakovosti mestnega življenja in predstavljajo pomemben ukrep za prilagajanje podnebnim spremembam. V članku je naveden pregled objav, v katerih so opisane urbane podnebne razmere in okoljski vplivi, ki so jim izpostavljena drevesa v mestnem okolju. Hkrati je v pregledu objav definirana vloga dreves v urbanem okolju, obravnavani pa so tudi dejavniki stresa pri urbanem drevju. Nekaj zbranih informacij opisuje toleranco in fiziološki odziv posameznih drevesnih vrst na podnebne spremembe in nekatere druge dejavnike stresa pri urbanih drevesih. Vključen je tudi opis mehanizmov, ki lahko pripomorejo pri omilitvi učinkov temperaturnega in sušnega stresa v mestnem okolju.

Ključne besede: urbana drevesa, podnebne spremembe, temperaturni stres, sušni stres, urbana mikroklima

Abstract:

Sever Brglez, B., Brglez Sever, M.: Response of the Urban Trees to the Climate Conditions in Urban Environment; Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry), 78/2020, vol 7-8. In Slovenian, abstract in English, lit. quot. 94. Translated by Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

In urban environment, trees structurally and ecologically add to the quality of urban life and represent an important measure for adapting to the climate change. The article presents the overview of the publications describing urban climate conditions and environmental impacts the trees in urban environment are exposed to. At the same time, the role of the trees in urban environment is defined in the overview; the stress factors in urban trees are also dealt with. Some of the gathered information describes the tolerance and physiological response of the individual tree species to the climate change and some other stress factors in urban trees. In addition, the description of the mechanisms which can add to the mitigation of the temperature and drought stress in the urban environment.

Key words: urban trees, climate change, temperature stress, drought stress, urban microclimate

1 UVOD

V urbanem okolju so drevesa generični gradnik mestne strukture in identitete ter predstavljajo nepogrešljiv in pomemben element, saj sooblikujejo primestni gozd, stanovanjska naselja, občestno krajino in parkovne površine. Urbana drevesa s strukturnega in ekološkega vidika prispevajo k podobi mesta in splošni kakovosti urbanega okolja, kar omogoča optimalne življenjske razmere za živali, rastline in ljudi. Urbano drevje v mestno okolje vnaša naravne in mehke linije ter z raznolikimi oblikami krošenj in barv prispeva k estetski podobi mestnega okolja. Hkrati drevesa

v urbanem okolju popestrijo monotonost ter uokvirjajo in dopolnjujejo arhitekturne detajle (Miller, 1988; Bavcon in sod., 1999; Jančar, 2001; Šiftar in sod., 2017).

V urbanem okolju so rastne razmere zahtevnejše kot v gozdu, saj so urbana drevesa izpostavljena spremenjenim mikroklimatskim razmeram, onesnaženju tal in zraka, visoki temperaturi zraka, omejeni razpoložljivosti vode, onesnaženosti tal s posipno soljo, slabi kakovosti tal, zbitim tlem in omejeni prostornini tal, pa tudi mehanskim poškodbam in sunkom vetra. Na urbana drevesa nezanemarljivo vplivajo tudi:

¹ Brezje pri Oplotnici 9, SI-2317 Oplotnica, Slovenija

* dopisni avtor: marinka_brglez@yahoo.com

spremenjen nivo podtalnice, zmanjšana vsebnost hranil v tleh in sušni stres (Wittig, 2008; Böll in sod., 2014; Forman, 2014; Schmidt, 2014). Prilagoditev dreves na podnebne spremembe je nujna, saj imajo lahko le zdrava in vitalna drevesa mikroklimatsko, gospodarsko in socialno korist (Menke in sod., 2013; Gillner in sod., 2014; Brune, 2016). Drevesa v urbanem okolju lahko s transpiracijo vode, zmanjšanjem hitrosti vetra in senčenjem površin vplivajo na lokalno mikroklimo in pomembno vplivajo na urbano hidrologijo, živalsko in rastlinsko raznovrstnost, onesnažen zrak ter ozon. Hkrati je nezanemarljiva vloga dreves v mestnem okolju pri zmanjševanju hrupa ter poplav in varčevanju z energijo (Robinette, 1972; Heisler, 1986). Neprimerni krajinski načrti lahko povečajo stroške energije in vode, raven cvetnega prahu, onesnaževanje zraka in popravilo infrastrukture (Van Druuff in sod., 1995).

V urbanih območjih je sušni stres dreves naj-večkrat posledica omejene razpoložljivosti vode zaradi povečanega površinskega odtoka ali nižjega

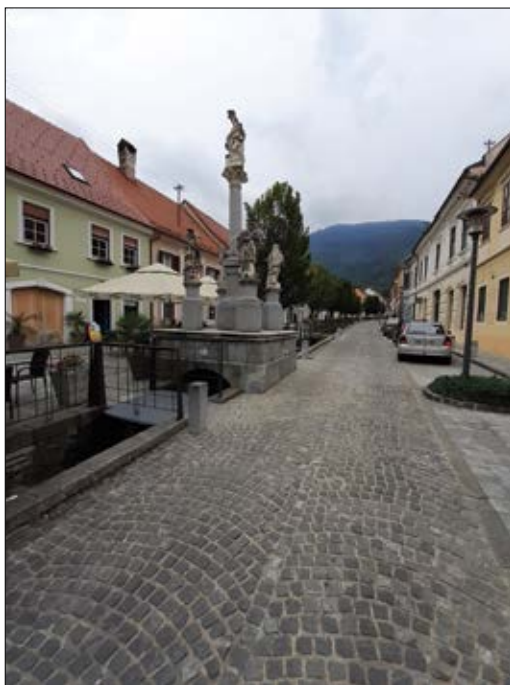
nivoja podtalnice. Medtem se toplotni stres pojavlja zaradi učinka mestnega toplotnega otoka in odvečne toplote, ki seva od mestnih zgradb (Wittig, 2008; Schönfeld in sod., 2011). Oba stresna dejavnika bi se lahko okreplila s pojavom še izrazitejših podnebnih sprememb (Forman, 2014). Hkrati je toplejše in suho mestno okolje ugoden habitat za invazivne škodljivce in patogene organizme (Böll in sod., 2014). Pri prilagajanju na podnebne spremembe je nujno ustrezno načrtovanje pri izbiri dreves in poznavanje fiziološkega odziva posameznih drevesnih vrst na sušni in temperaturni stres. Drevesa, ki se odlikujejo s sposobnostjo uspešne prilagoditve na sušni in temperaturni stres (anisohidrične vrste), so primernejša izbira za urbana območja s podnebnimi spremembami kot drevesa, ki so za tovrstne strese manj tolerantna (izohidrične vrste) (Burk, 2006; McDowell in sod., 2008).

Namen članka je predstaviti podnebno vlogo dreves v urbanem okolju in analizirati dejavnike stresa (temperaturni in sušni stres, onesnaženost s popisno soljo, pomanjkanje kisika v tleh), ki lahko ob podnebnih spremembah pomembno vplivajo na rastne razmere in vitalnost dreves ter zmožnost opravljanja njihove ekološke in estetske funkcije v mestnem okolju. Hkrati je cilj prispevka predstaviti odziv posameznih drevesnih vrst na posledice podnebnih sprememb in nekatere mehanizme, ki lahko pripomorejo k obvladovanju temperaturnega in sušnega stresa v urbanem okolju.

2 VLOGA URBANIH DREVES V MESTNEM OKOLJU

2.1 Urbana drevesa in podnebne razmere v mestnem okolju

V urbanih okoljih so drevesa nepogrešljiva stalnica, ki poleg prispevka k ekološki, družbeni in estetski funkciji koristijo tudi kot »orodje« za zmanjševanje posledic že izrazitih podnebnih sprememb. Urbana drevesa pripomorejo k omilitvi učinkov ekstremnih vremenskih pojavov (visoke temperature zraka, dolga sušna obdobja, večji nalivi, močan veter). Hkrati imajo drevesne krošnje sposobnost zmanjšanja učinkov povečane stopnje škodljivega UV-B-sončnega sevanja, količine ozona in drugih škodljivih delcev v zraku (Heisler in sod., 1995; Bavcon in sod., 1999; Šiftar in sod., 2017).



Slika 1: Drevesa v urbanem okolju prispevajo k estetski, ekološki, družbeni, gospodarski in kulturni vrednosti v mestnem okolju. Lokacija: Stari trg, Slov. Konjice. (foto: M. Brglez Sever)

Gradbene strukture in dejavnosti znotraj mestnih območij lahko vplivajo na mikroklimatske razmere (Kleerekoper in sod., 2012). V tem kontekstu je v strokovni literaturi najpogosteje opisan mestni toplotni otok (MTO), za katerega so značilne višje temperature zraka v urbanih okoljih v primerjavi s podeželsko okolico, kar je posledica gostote poselitve, načina poselitve ter drugih, predvsem s človekom povezanih dejavnikov. MTO je najizrazitejši ob radiacijskem (anticiklonalnem) vremenu predvsem v večjih mestih, njegov vpliv pa je mogoče zaznati tudi v središčih manjših vasi, kjer so hiše zelo skupaj (Malenšek, 2020). Po poročanju Kuttler (2008) ter Memon in sod. (2008) dolgovalovno sončno sevanje absorbira gradbeni material in v kombinaciji z antropogenimi toplotnimi emisijami povzroči temperaturni gradient med podeželjem in mestom. Temperaturna razlika je najizrazitejša ponoči in v povprečju doseže od 1 °C do 4 °C. V ekstremnih situacijah, npr. med vročinskimi valovi, lahko doseže tudi 9 °C

(Heidt in Neef, 2008; Doick in Hutchings, 2013). Zaradi segrevanja ozračja se zrak nad mestom, najizraziteje nad mestnim središčem, dviga, kar povzroči dotok zraka iz mestnega obrobja in s tem povečanje koncentracije nečistih snovi v zraku v središču mesta (Komac in sod., 2017).

Med pomembne ukrepe za prilagajanje podnebnim spremembam v mestnem okolju spada urbana vegetacija (parki, zasebni vrtovi, manjše javne zelene površine, drevesa), ki izboljša mikroklimatske razmere in vpliva na dobro počutje ljudi (Dimoudi in Nikolopoulou, 2003; Kleerekoper in sod., 2012). Povečevanje zelenih površin, parkov in sajenje dreves v mestnem okolju je eden od učinkovitih ukrepov, ki pripomore k zmanjševanju pojava mestnega toplotnega otoka (Komac in sod., 2017; Kaplan, 2019). Mestna drevesa delimo v tri kategorije: ulična in parkovna drevesa ter drevesa na obrobju mest (Benedikz in sod., 2005). Pri izboru drevesne vrste za ureditev novih ali nadomestnih saditev je potrebno, ne glede na lokacijo sajenja, oceniti prilagojenost drevesne vrste rastišču, rastnost in habitus glede na bližino objektov in infrastrukturo ter pričakovano življenjsko dobo vrst/sort. Hkrati je treba upoštevati tudi prilagojenost posamezne drevesne vrste razmeram v mestnem okolju, sestavo in vlažnost tal, svetlobne in toplotne razmere ter prostorske zahteve, pa tudi odpornost proti mrazu, onesnaževanju, škodljivcem ter boleznim. Pri načrtovanju rastišč za drevesa je treba poskrbeti, da ima drevo dovolj prostora, svetlobe, vlage in hranil za normalno razrast. Način sajenja se razlikuje glede na nove ali nadomestne zasaditve. Pri izbiri vrst je treba posebno pozornost nameniti napovedanim podnebnim spremembam, ki se v naših krajih že kažejo v podaljševanju sušnih, mrzlih in toplih mesecev ter velikih nalivih (Marion in sod., 2009; Roloff, 2013a; Šiftar in sod., 2017).

Glavni vzrok za spremenjene podnebne razmere v urbanih okoljih je spremenjena energijska bilanca, ki je posledica nadomeščanja naravnih zelenih površin in rastlin z zaprtimi površinami in zgradbami (Kuttler, 2008; Kleerekoper in sod., 2012; Doick in Hutchings, 2013). Drevesa v mestnem okolju vplivajo na temperaturo zraka in relativno zračno vlago. V urbanem okolju je nižja relativna zračna vlaga posledica zmanjšane



Slika 2: Urbana drevesa se morajo soočiti z zahtevnejšimi ravnimi pogoji kot gozdno drevje. (foto: M. Brglez Sever)

evapotranspiracije, povečanega onesnaževanja zraka ter zmanjšane hitrosti vetra zaradi gradbenih ovir, kar neposredno vpliva na manjše poletno pregrevanje. Z absorpcijo sončnih žarkov drevesa zmanjšajo segrevanje mestnih površin in hkrati pripomorejo k hladnejšemu zraku v poletnih mesecih (Menke in sod., 2013). V neposredni bližini dreves je lahko temperatura zraka od 5 do 15 °C nižja kot na območjih, kjer ni dreves. Drevo v krošnji zadrži 30 % padavin, ki jih prestreže; dodatnih 30 % padavin zadrži s koreninami. Izhlapevanje vode v poletnih mesecih ugodno vpliva na podnebne razmere v mestu. V poletnih mesecih lahko evapotranspiracija pripomore k znižanju temperature zraka od 1 do 5 °C, in sicer samostojno ali v kombinaciji s senčenjem dreves. V urbanem okolju so predvsem ob prometnicah primernejša listopadna drevesa, saj lahko senca dreves iglavcev vpliva na daljšo poledenost prometnih cest (Huang in sod., 1990; Šiftar in sod., 2017). Urbana drevesa lahko vplivajo tudi na ultravijolično sevanje in albedo (Lenschow, 1986).



Slika 3: Drevesa ob cestišču so izpostavljena onesnaženju s posipno soljo. (foto: M. Brglez Sever)

Drevesa v urbanem okolju ovirajo, odklanjajo in filtrirajo gibanje zraka in vplivajo na smer in hitrost vetra, ki je lahko zmanjšana od 15 do 50 %. Intenzivnost redukcije vetra je odvisna od razporeditve in števila dreves ter gostote listja na drevesu. Pri šibkem vetru lahko pravilno zasajena drevesa omogočajo celo brezveterje (Miller, 1988; Heisler in sod., 1995; Šiftar in sod., 2017).

Drevesa lahko zelo zmanjšajo sončno sevanje, tudi za več kot 90 % (Heisler, 1986). V času najintenzivnejšega sončnega sevanja listopadna drevesa nudijo senco. Pod posameznimi drevesi ali skupino dreves je lahko temperatura zraka do 1 °C nižja kot na površinah, ki niso ozelenjene. Pozimi neolistanne krošnje listopadnih dreves prepuščajo dragocene sončne žarke (Souch in Souch, 1993). Kombinacija evapotranspiracije, senčenja ter mešanja hladnega in toplega zraka lahko temperaturo zraka zniža do 5 °C (Akbari in sod., 1992).

2.2 Drevesa in urbana hidrologija

Urbani gozdovi in drevesa imajo velik potencial za zmanjševanja površinskega odtoka, saj povečujejo infiltracijo tal in evapotranspiracijo. Drevesne krošnje prestrezajo padavine in uravnavajo količino padavin, ki dosežejo tla, s črpanjem vode preko korenin pa drevesa porabljajo vodo iz tal. Korenine stabilizirajo tla in skupaj z listnim opadom zmanjšujejo erozijo. Kakovost vode je tesno povezana s površinskim odtokom. Padavine odtečejo v kanalizacijo ali neposredno v urbane vodotoke, jezera ali mokrišča. Preden voda doseže kanalizacijski sistem ali vodni vir, pobere in nese mnogo hranil, težkih kovin, organskih onesnaževal in drugih škodljivih snovi s cestišč, pločnikov, dvorišč ipd. Drevesne korenine, listni opad in rastline lahko iz vode odstranijo velik del onesnaževal, usedlin in hranil in tako zmanjšajo delež škodljivih snovi, ki bi dosegle podtalne ali površinske vode. Drevesne krošnje lahko nad vodotoki in mokrišči znižujejo tudi temperaturo vode, kar pomeni več raztopljenega kisika in manj ugodne razmere za uspevanje alg (Göbel in sod., 2004; Vilhar, 2016). Mestni gozd z 10.000 drevesi lahko zadrži skoraj 38 milijonov litrov deževnice na leto. Več dreves v urbanem okolju pomeni nižje stroške odvodnjavanja (angl. stormwater management; Jaffe in sod., 2010) (Trees for

People, 2014). Drevesa v urbanem okolju lahko zmanjšajo škodo zaradi naraslih voda ali poplav, stroške čiščenja ob poplavih ali stroške, povezane z vzdrževanjem kakovosti vode (Dolejši, 2009).

2.3 Vpliv urbanih dreves na biotsko raznovrstnost

Urbana vegetacija prispeva k dolgoročnemu delovanju mestnih ekosistemov, ki so za urbane prostoživeče živalske vrste življenjski prostor in vir hrane. Za proces migracij prostoživečih živali v urbanem okolju so pomembne večje gozdne, vodne in zelene površine (Van Druuff in sod., 1995). Urbanizacija lahko privede do ustvarjanja in izboljšanja rastlinskih habitatov, kar posledično povečuje biotsko raznovrstnost. Hkrati so mestni parki lahko rezervoar za ogrožene rastlinske vrste. Vnos novih, tujih rastlinskih vrst v urbana območja lahko povzroči težave pri izpodirvanju avtohtonih vrst. Hkrati lahko spreminjanje vegetacijske strukture v urbanih območjih spremeni razširjenost in pojav novih rastlinskih bolezni in škodljivcev (Nowak in McBride, 1992; Howenstine, 1993).



Slika 4: Ustrezno načrtovano sajenje dreves v bližini stavb v mestnem okolju, lahko pripomore k zmanjšanju stroškov ogrevanja ali hlajenja. (foto: M. Brglez Sever)

2.4 Učinki dreves na onesnažen zrak

Drevesa v mestnem okolju vplivajo na zmanjšanje onesnaženosti zraka. Škodljive snovi iz zraka sprejemajo po načelu absorpcije in impaktacije (Menke in sod., 2013). Za rast listi dreves absorbirajo iz zraka ogljikov dioksid in druga onesnaževala zraka, kot so ogljikov monoksid, žveplov dioksid in ozon, ter hkrati v zrak oddajajo kisik. Drevesa odstranjujejo mikroprašne, v zraku lebdeče delce, ki jih prestrežejo na listno površino. Onesnaženi atmosferski delci se na listni površini zadržijo začasno in se sperejo s padavinami ali pa se resuspendirajo v ozračje, odstranijo z odpadanjem listja ali z rezjo (Smith, 1990; Šiftar in sod., 2017).

Stopnja učinkovitosti dreves na zmanjšanje onesnaženosti zraka je odvisna od zdravstvenega stanja listne površine, dolžine obdobja olistanja, stopnje transpiracije, usedanja in koncentracije lokalnih polutantov in lokalnega vremena (Nowak, 2002). Učinkovitost izboljšanja kakovosti zraka je med drevesnimi vrstami različna, zato je v urbanih naseljih potrebna ustrezna pestrost drevesnih vrst in grmov. V procesu zmanjševanja onesnaženosti zraka so iglavci učinkovitejši kot listopadna drevesa. Pline, kot so NO_x in O_3 , dobro prestrezajo listavci s širokimi in gladkimi listi. Pri listavcih so za prestrezanje prašnih delcev učinkoviti grobi, poraščeni in lepljivi listi (Smith, 1990; Menke in sod., 2013; Šiftar in sod., 2017).

2.5 Vloga dreves pri zmanjšanju hrupa

Pravilno zasnovane zasaditve dreves in grmovnic lahko znatno zmanjšajo hrup v mestnem okolju. Listi in stebela zmanjšajo zvok tako, da ga »razpršijo« (Aylor, 1972). Drevesa in grmovnice lahko hrup prekrijejo tudi z ustvarjanjem lastnega zvoka ali z vizualnim blokiranjem izvora hrupa zmanjšajo posameznikovo dojetje jakosti hrupa. Učinkovitost vegetacije pri zmanjševanju hrupa je odvisna od zvoka, bližine izvora hrupa, rastlinske vrste, uporabljene konfiguracije sajenja in podnebnih razmer. Drevesa z večjimi dlakavimi listi ter z veliko gostoto listja v notranjosti krošnje in pravokotno postavitvijo listov glede na vir zvoka bolj blažijo hrup (Robinette, 1972; Anderson in sod., 1984; Šiftar in sod., 2017).

2.6 Urbano drevje in varčevanje z energijo

S primerno načrtovanim sajenjem dreves v bližini stavb lahko zmanjšamo stroške njihovega ogrevanja ali hlajenja. Kvantitativno je varčevanje z energijo odvisno od podnebja, lokacije, vrste in razporeditve dreves ter količine in velikosti listov (Akbari in sod., 1992; Nowak, 2002). Drevesa s hlajenjem in vlaženjem zraka vplivajo na mikroklimo, kar zmanjšuje potrebo energije za klimatizacijo stavb v bližini odraslih dreves. Poleti listopadna drevesa prestrežejo od 75 do 90 % sončne svetlobe, kar zagotavlja naravno hlajenje stavb (Hough, 2004). Velika drevesa listavcev v zimskih mesecih dopuščajo prodiranje svetlobe v zgradbe, kar omogoča izkoristek naravnega ogrevanja sonca (Brown in Gillespie, 1995). Hkrati drevesa zimskim vetrovom ovirajo dostop do stavb in zmanjšajo stroške ogrevanja v zimskih mesecih. Nepravilna razporeditev dreves v bližini stavb lahko poveča stroške ogrevanja ali klimatizacije (Nowak, 2002).



Slika 5: Urbana vegetacija prispeva k izboljšanju mikroklimatskih razmer in vpliva na dobro počutje mestnih prebivalcev. (foto: M. Brglez Sever)

2.7 Učinki dreves na emisijo hlapnih organskih spojin in ozona

Nekatera drevesa v ozračje oddajajo hlapljive organske spojine – VOC (Volatile Organic Compounds). Oddajanje VOC je odvisno od temperature zraka in vrste rastline. Če je zrak hladnejši, je oddajanje VOC manjše, zato je v zraku manj škodljivega ozona. Pri tvorbi ozona so katalizatorji predvsem derivati izoprena in monoterpeni, iz katerih nastajajo smole in drugi organski izločki, ki sodelujejo v procesu usedanja polutantov na površino dreves ter hkrati drevesom koristijo pri privabljanju oprasovalcev in zaščiti pred škodljivci (Kramer in Kozłowski, 1979; Šiftar in sod., 2017). Količina hlapljivih organskih zmesi je odvisna od drevesne vrste, temperature zraka in količine biomase urbanih dreves. Velika populacija dreves v urbanem okolju lahko vpliva na zmanjšanje koncentracije ozona (Cardelino in Chameides, 1990).

3 DEJAVNIKI STRESA PRI DREVESIH V URBANEM OKOLJU

3.1 Sušni stres

Suša je pri drevesih najpogostejši stresni dejavnik, zlasti v urbanih območjih, kjer je razpoložljivost z vodo manjša. Poleg neposrednega vpliva (npr. zaviranje rasti, odpadanje listov) suša vpliva na večjo dovzetnost dreves za pojav škodljivcev in bolezni. Toleranca na sušo je pri starejših drevesih večja kot pri mlajših (Siewniak in Kusche, 2009). Drevesa se lahko suši prilagajajo z zmanjšanjem površine listov, razširitvijo koreninskega sistema idr. Koreninski sistem se razvija glede na prevladujoče razmere v tleh (vrsta tal, oskrba z vodo, vsebnost vlage, oskrba s hranili). V primeru zadostne preskrbljenosti z vodo se korenine razvijejo predvsem v zgornjem sloju tal, z zmanjšanjem količine razpoložljivosti vode pa se koreninski sistem razširi v globlje sloje tal (Burk, 2006).

Odziv dreves na fiziološko sušo je lahko kratkoročen, srednjeročen ali dolgoročen (Roloff, 2010). Kratkoročen odziv dreves na sušo se pojavi, ko se tla izsušijo in se zmanjša njihova hidravlična prevodnost. Listne reže se zaprejo zaradi zmanjšanja vodnega potenciala. Sposobnost zmanjšanja vodnega potenciala v koreninah, stebelu in listih se kaže kot prilagoditev sušnemu stresu (Stöhr in

Lösch, 2004). Vendar v daljšem sušnem obdobju tudi zmanjšanje vodnega potenciala ne zadostuje za vzdrževanje potrebne oskrbe z vodo. Zapiranje listnih rež lahko povzroči ali poveča temperaturni stres in prepreči sprejem ogljikovega dioksida. Ker zaprtje listnih rež v celoti ne prepreči izgube vode, daljše in neprekinjeno pomanjkanje vode povzroči poškodbe na listih, ki lahko tudi odpadejo (Bréda in sod., 2006; Burk, 2006; Roloff, 2013a). Fiziološka suša negativno vpliva na številne procese, kot so: rast celic, sinteza celične stene in fotosinteza (Hsiao, 1973). V daljšem in neprekinjenem obdobju fiziološke suše se pojavijo srednjeročni odzivi dreves. Drevesa zaradi zmanjšanja izgube vode v procesu transpiracije odvržejo liste ali v nekaterih primerih (npr. pri hrastu) tudi celotne olistane veje. V letih, ki sledijo dolгим sušnim obdobjem, se na drevesih razvijejo manjši listi (Rust in Roloff, 2004; Roloff, 2013b). Posledica zmanjšane listne površine ter daljšega in neprekinjenega obdobja zaprtosti listnih rež je pojav dolgoročnih odzivov dreves na sušo,

kot je okrnjena rast poganjkov in debela. Kratki poganjki imajo v primerjavi z daljšimi zmanjšano sposobnost prevodnosti vode (Bréda in sod., 2006; Roloff, 2013b).

Fiziološki odziv na sušo se med različnimi drevesnimi vrstami razlikuje (Ryan, 2011). Izohidrične vrste (*A. pseudoplatanus*, *B. pendula*, *P. nigra*, *Q. robur*) zmanjšajo stomatalno prevodnost listov, če se v tleh zmanjšuje potencial vode. Zmanjša se izguba vode in hkrati prepreči zmanjšanje potenciala vode v listih (Stöhr, 2003; McDowell in sod., 2008; Herrero in sod., 2013; Zapater in sod., 2013; Urli in sod., 2014). Slaba stran izohidričnega odziva je tveganje za pomanjkanje ogljika, saj se fotosinteza zmanjšuje z zapiranjem listnih rež (Allen in sod., 2010). Izohidrične vrste slabo prenašajo sušo in prenesejo le kratka sušna obdobja (Gill in sod., 2013). Anisohidrične vrste (*A. glutinosa*, *F. excelsior*, *F. sylvatica*) ohranjajo višjo stomatalno prevodnost listov in se tako soočajo z večjimi izgubami vode in z zmanjšanjem vodnega potenciala listov. Zaradi sposobnosti osmotske prilagoditve se lahko odzivajo z zmanjšanjem osmotskega potenciala (Stöhr, 2003; McDowell in sod., 2008; Worrall in sod., 2010; Pretzsch in sod. 2014). Tveganje za pomanjkanje ogljika je pri anisohidričnih vrstah manjše kot pri izohidričnih, ker listne reže ostajajo odprte (Allen in sod., 2010).

3.2 Temperaturni stres

Temperaturni stres vpliva na metabolizem in vitalnost dreves in nastane kot posledica neposrednega sončnega sevanja ali visokih temperatur zraka. Nekatero površine v mestnih območjih (zlasti nad asfaltom in betonom) lahko v toplem delu leta, pri brezveterju in močnem sončnem sevanju dosežejo do 70 °C (Larcher, 2001; Roloff, 2013b). Odrasla drevesa so manj izpostavljena temperaturnemu stresu kot grmičevje in zeliščno rastje. Kljub temu lahko visoke temperature v bližini tal vplivajo na sadike dreves in mlajša drevesa (Schulze in sod., 2005; Roloff, 2010). Pri sočasnem pojavu temperaturnega in sušnega stresa je lahko vzrok za pregrevanje rastlin zaprtje listnih rež. V takem primeru se transpiracija zmanjša in ni zagotovljeno potrebno hlajenje listov (Bréda in sod., 2006). Visoke temperature zraka



Slika 6: V urbanem okolju je pri prilagajanju na podnebne spremembe potrebna pravilna izbira drevesnih vrst in dosledna nega dreves. (foto: M. Brglez Sever)

lahko povzročijo zmanjšanje fotosinteze, izgubo celovitosti membrane, denaturacijo encimov in posledično zmanjšanje encimske aktivnosti ter tkivno nekrozo (Roloff, 2013b; Jones, 2014). Pri drevesih, ki so prilagojena senčnim območjem, lahko nastanejo poškodbe pri 40 °C. Temperaturni stres pri listavcih povzroči poškodbe pri 50 °C (Schulze in sod., 2005; Roloff, 2010).

Drevesa se temperaturnemu stresu lahko izognejo z različnimi mehanizmi, vključno z obliko in položajem listov, tj. z izpostavljenostjo neposredni sončni svetlobi. K hlajenju dreves lahko pripomore proces transpiracije, kar je lahko problematično, če je ob pojavu temperaturnega stresa sočasno omejena oskrba z vodo (Schulze in sod., 2005). Kombinacija vročine in suše lahko za drevesa učinkuje kompleksno, kar je odvisno od trajanja in pogostosti obeh stresov (Allen in sod., 2010). Zato je treba posebno pozornost nameniti sekundarnim vplivom visokih temperatur. Pri temperaturi zraka pod 5 °C potekajo kemijski procesi v drevesih počasneje. Za mrz občutljive rastline ali tkiva so lahko poškodovani že pri -1 °C (Schulze in sod., 2005).

3.3 Onesnaženost s posipno soljo

Povišane vrednosti natrija v tleh povzročijo zbitost tal ter zmanjšajo oskrbo korenin s kisikom. Hkrati lahko povišane koncentracije natrijevega klorida v tleh povečujejo alkalnost tal in preprečijo sprejem kalcija in kalija. Posledično se lahko pojavijo kloroze na listih, zemlja postane manj sipka in zadržuje manj vlage in hranljivih snovi. Onesnaženost s soljo lahko ovira naravno osmozo rastlin (Okolje v Sloveniji, 1998; Roloff, 2008). Natrijev klorid v drevesu povzroči motnje v funkciji membran in encimov. Fiziološka suša, ki nastane zaradi posipanja s soljo, omeji sposobnost fotosinteze (Schulze in sod., 2005).

3.4 Pomanjkanje kisika v tleh

Med vegetacijsko dobo znaša dnevna poraba kisika v tleh od 10 do 20 l/m². Količina porabe kisika v tleh je odvisna od prepletenosti korenin in dejavnosti mikrobov v tleh. Na proces izmenjave zraka med tlemi in atmosfero pomembno vpliva struktura zgornjega horizonta tal. Oskrba

kisikom je pri urbanih drevesih pogosto omejena ali celo preprečena zaradi zbitosti tal, kar povzroči motnje pri izmenjavi plinov med ozračjem in koreninami. Zmanjšana oskrba s kisikom pri manjših koreninah dreves lahko povzroči nezadostno oskrbo drevesa z vodo in hranljivimi snovmi (Rust, 2008, cit. po Roloff, 2008).

4 TOLERANCA NA DEJAVNIKE STRESA PRI NEKATERIH DREVESNIH VRSTAH

Navadni divji kostanj (*Aesculus hippocastanum* L.) uspeva predvsem na delno zasenčenih, pred vetrom zaščitene območjih. Čeprav najbolje uspeva na vlažnih, toplih in zračnih rastiščih, ima veliko ekološko amplitudo in se prilagaja različnim podnebnim razmeram (Schmidt in Roloff, 1996). Najbolje raste pri polni osvetljenosti, brez poškodb prenese temperaturo do -30 °C. Pozeba prizadene mlade rastline na preveč mokrih tleh. Občutljiv je za posipno sol (Fischer, 2005) in zmerno tolerant za sušo ter dobro prenaša onesnažen zrak (Brus, 2012; Roloff, 2013a). Kot urbano drevo je pogosta izbira, predvsem zaradi njegovega senčenja in estetske vrednosti (Roloff, 2005).

Navadna breza (*Betula pendula* Roth) je zaradi svoje estetske in kulturne vrednosti priljubljena drevesna vrsta v urbanih območjih (Roloff, 2013a). Drevo potrebuje veliko svetlobe, vendar ni zahtevno glede tal in razpoložljivosti vode ter lahko raste tudi v bolj ekstremnih razmerah. Najraje raste na rahlih, peščeno-ilonvatih in nekoliko zakisanih tleh, vendar lahko uspeva tudi na skrajno revnih, izčrpanih in degradiranih rastiščih. Dobro prenaša onesnaženost s posipno soljo in je odporna proti nizkim zimskim temperaturam in slani. Slabše prenaša sušo in sončno pripeko, zlasti v mladosti (Burk, 2006; Roloff in Bonn, 2008; Brus, 2012; Zinauer in Bejo, 2020).

Navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.) najbolje uspeva v globokih, s kalcijem bogatih humoznih tleh. Je občutljiva za nizke temperature, sušo in mokra tla (Muck in sod., 2009). Predvsem mlada drevesa so občutljiva za spomladansko pozebo in daljšo sušo. *F. sylvatica* je prikladno drevo za mestne parke, medtem ko zaradi občutljivosti za posipno sol ni primerna kot obcestna vegetacija.

Preglednica 1: Toleranca na nekatere dejavnike stresa pri posameznih drevesnih vrstah

Drevesna vrsta	Toleranca na nekatere dejavnike stresa			
	mraz	suša	posipna sol	osiromašena tla
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	*	**	***	**
<i>Betula pendula</i> Roth	*	**	**	*
<i>Fagus sylvatica</i> L.	**	**	***	***
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	**	**	*	**
<i>Acer platanoides</i> L.	*	*	**	**
<i>Alnus glutinosa</i> L.	*	*	**	**
<i>Populus nigra</i> L.	*	***	**	**
<i>Quercus robur</i> L.	**	**	**	***
<i>Salix alba</i> L.	**	***	*	**

*dobra; **zmerna; ***slaba;

Slabo prenaša mestno okolje, zlasti zbita tla in industrijske pline (Brus, 2012; Gillner, 2012). Drevo se lahko z uporabo reverzibilnih morfoloških sprememb prilagodi začasnim sušnim obdobjem (Roloff in Grundmann, 2008).

Veliki jesen (*Fraxinus excelsior* L.) uspeva v različnih podnebnih, talnih in vodnih razmerah (Stöhr, 2003; Clark, 2013); najdemo ga na vlažnih, dobro prepustnih in s hranili bogatih tleh. Občutljiv je za zmrzal in bolje uspeva v toplih območjih. Suše ne prenaša dobro, vročino le ob obilici vlage. Njegova potreba po svetlobi je zelo odvisna od starosti; v mladosti je sencozdržna rastlina, pozneje svetloljubna. Zaradi tolerance na posipno sol ter zbitost tal in onesnaženje ter estetske vrednosti in nizke stopnje ogroženosti zaradi boleznin in škodljivcev, ga uvrščamo med primerna drevesa za urbana območja (Pietzarka in Roloff, 2000; Percival in sod., 2006; Brus, 2012).

Ostrolistni javor (*Acer platanoides* L.) najbolje uspeva v zmerno celinskem podnebnju s toplimi poletji (Brune, 2016). Je polsencozdržna vrsta in najraje raste na rahlih, svežih in bogatih tleh, a prenese tudi bolj sušna, vlažna ali revnejša rastišča. Odporen je proti onesnaženemu zraku in močnemu vetru, dobro prenaša nizko temperaturo, slano in onesnaženost s posipno soljo (Brus, 2012; Zinauer in Bejo, 2020). Ni občutljiv za sušo in se dobro prilagaja sušnemu stresu. *A. platanoides* je na urbanih zelenih površinah priljubljen zaradi

svoje floescence, manj primeren je kot obcestna vegetacija (Roloff in sod., 2009; Roloff, 2013a).

Črna jelša (*Alnus glutinosa* L.) je razširjena v Evropi, pretežno v nižinah in nižjih gorskih območjih (Pietzarka in Roloff, 2000). V rastni sezoni potrebuje dovolj svetlobe in toplote, hkrati dobro prenaša tudi zmrzal. *A. glutinosa* prenese temperaturo do 44 °C brez poškodb listov. Je zelo zahteven glede oskrbe z vodo in vsebnosti vlage v tleh (Breunig in sod., 2002; Walentowski in Ewald, 2003; Claessens in sod., 2010). Najraje raste na mokrih, globokih, humoznih, nekoliko kislih glinasto-ilovnatih ali peščenih aluvialnih tleh. Slabo prenaša suha tla in je zmerno tolerantna na posipno sol (Gilman in Watson, 1993; Brus, 2012).

Črni topol (*Populus nigra* L.) je razširjen v Evropi, severni Afriki ter zahodni in srednji Aziji (Weisgerber, 1999; Huber, 2010). Uspeva v toplem podnebnju, a hkrati dobro prenaša mrz in potrebuje zadostno oskrbo z vodo in hranili ter dovolj svetlobe (Roloff in Bonn, 2008). Najbolje raste na vlažnih, zračnih, aluvialnih in rahlo peščenih tleh. Zelo dobro prenaša onesnažen zrak in ni občutljiv za posipno sol (Brus, 2012; Zinauer in Bejo, 2020). *P. nigra* je zelo občutljiv za sušo in se dobro prilagodi visoki vlažnosti tal pa tudi začasnim poplavam (Weisgerber, 1999; Marron in sod., 2006) in po poročanju Monclus in sod. (2006) ni najboljša izbira za urbano okolje.

Dob (*Quercus robur* L.) je eden najpogostejših in gospodarsko pomembnih dreves v srednji Evropi (Aas, 2002). Najbolje raste na globokih, mineralno bogatih, humoznih tleh z visoko podtalnico in na občasno poplavljenih tleh *Q. robur* je dobro ukoreninjen zmerno tolerant do suše in je po poročanju Roloffa (2013a) in Brusa (2012) prikladna drevesna vrsta za urbano okolje. Koller in sod. (2013) pri daljšem obdobju sušnega stresa (>50 dni) poročajo o ireverzibilnem zmanjšanju fotosintetske aktivnosti in osipanju listja. Je svetloljubna drevesna vrsta, včasih prenese rahlo senčenje in ni občutljiv za posipno sol (Zinauer in Bejo, 2020). Občutljiv je za pozno spomladansko pozebo (Brus, 2012).

Bela vrba (*Salix alba* L.) je razširjena predvsem v zmernih, subcelinskih podnebnih razmerah (Schirmer in Stimm, 1999). Je neobčutljiva za onesnaženost tal s posipno soljo, a ne prenaša poznih zmrzali. Je zelo tolerantna do poplav in visokega nivoja podtalnice ter najbolje uspeva na rodovitnih, globokih, vlažnih aluvialnih tleh, pogosto tudi na peščenih ali težkih zamočvirjenih (Türk, 1999; Breunig in sod., 2002; Brus, 2012). *S. alba* je občutljiva za sušo in v večjem sušnem stresu odvrže tudi celotne zelene veje, da zmanjša izgubo vode zaradi transpiracije, zato ni najboljša izbira za urbano okolje (Roloff, 2013a).

V Preglednici 1 je predstavljena toleranca na nekatere dejavnike stresa (mráz, sušo, posipno sol in osiromašena tla) pri posameznih drevesnih vrstah. Podatki so povzeti po literaturi iz poglavja 4: Toleranca na dejavnike stresa pri nekaterih drevesnih vrstah.

5 ZAKLJUČEK

Drevesa v urbanem okolju pripomorejo k omilitvi škodljivih posledic že obstoječih podnebnih sprememb. Ekstremni vremenski pojavi, kot so vroča in suha poletja ter pozne pozebe spomladi, lahko spremenijo lokalno mikroklimo in vplivajo na počutje ljudi in drugih živih bitij v urbanem okolju. Dosedanje raziskave kažejo, da je prilagoditev urbanih dreves na podnebne spremembe nujna za ohranjanje njihove ekološke, gospodarske in estetske vloge. Drevesa imajo v mestnem okolju pomembno vlogo, saj ugodno vplivajo na urbano mikroklimo, hidrologijo, rastlinsko in živalsko pestrost ter kakovost zraka. Zaostrene razmere

urbanega okolja, ki so posledica spremenjenih mikroklimatskih razmer, onesnaženja, visokih temperatur zraka, zmanjšane razpoložljivosti vode ter slabe kakovosti tal, vplivajo na rast in vitalnost urbanih dreves. Sušni in temperaturni stres škodljivo vplivata na številne kemične procese in povečata dovzetnost dreves za bolezni in škodljivce. Drevesa obvladujejo škodljive vplive stresnih dejavnikov z različnimi obrambnimi mehanizmi, ki pripomorejo k ohranitvi dreves in njihovih funkcij v mestnem okolju. Pri prilagajanju na podnebne spremembe v urbanem okolju je potrebno ustrezno krajinsko načrtovanje, pravilna izbira drevesnih vrst in dosledna nega dreves. Strokovno poznavanje tolerance in fiziološkega odziva posameznih drevesnih vrst na ekstremne vremenske razmere je ključno pri izboru dreves in prilagajanju na podnebne spremembe v urbanem okolju.

6 POVZETEK

Vse pogostejši in intenzivnejši škodljivi učinki podnebnih sprememb kažejo na potrebo po ukrepih, ki lahko pripomorejo k prilagoditvi na podnebne spremembe v mestnem okolju. Urbana vegetacija, kot so parki, drevesa, zelene površine idr., spada med najpomembnejše ukrepe za prilagajanje podnebnim spremembam v urbanem okolju, saj prispeva k izboljšanju mikroklimatskih razmer in vpliva na dobro počutje mestnih prebivalcev. Podnebne spremembe in z njimi povezani ekstremni vremenski pojavi, kot sta sušni in temperaturni stres, vplivajo na rast in vitalnost urbanih dreves ter zagotavljanje njihovih funkcij, od ekološke, estetske, gospodarske ter družbene. Dodatne obremenitve za urbano drevje so tudi: izpostavljenost mehanskim poškodbam, onesnaženje tal in zraka, onesnaženost tal s posipno soljo, zmanjšana vsebnost hranil v tleh, zbitost tal, manjša razpoložljivost vode idr.

Urbana drevesa blažijo učinke podnebnih sprememb, posebno ekstremnih vremenskih pojavov, saj vplivajo na zmanjšanje stopnje sončne obsevanosti. Hkrati drevesa znižujejo temperaturo zraka ter povečujejo relativno zračno vlago, kar zmanjšuje učinek poletnega pregrevanja. Drevesa v urbanem okolju nudijo protivetno zaščito in pripomorejo k vzdrževanju normalnega vodnega kroga, zadržujejo padavinsko vodo in zmanjšajo škodo

zaradi naraslih voda in poplav. Drevje v mestnem okolju vpliva na zmanjšanje emisij ter onesnaženosti zraka in ima aktivno vlogo pri nastajanju kisika. Drevesa pripomorejo tudi k varčevanju z energijo, blažijo hrup in ohranjajo rastlinsko in živalsko pestrost v urbanem okolju. Drevesne krošnje lahko učinkovito omilijo vplive povečane stopnje škodljivega UV-B-sevanja, količino ozona in nekaterih drugih škodljivih delcev v zraku.

Optimalne življenjske razmere dreves lahko porušijo obremenitve, ki jih povzročijo stresni dejavniki. Poleg biotičnih stresnih dejavnikov (npr. okužba s patogeni) na drevesa pomembno vplivajo abiotični dejavniki (npr. vročina, mraz, pomanjkanje vode). Suša je eden najpogostejših stresnih dejavnikov, ki na drevo vpliva neposredno (zavira rast ali povzroči odpadanje listov) in hkrati povzroči večjo dovzetnost dreves za bolezni in škodljivce. Sušni stres lahko vpliva na proces rasti celic, sintezo celične stene, fotosintezo, zmanjšanje vodnega potenciala in listne površine, odpad listov ali olistanih vej ter zmanjšano rast poganjkov in debla. Drevesa se sušnemu stresu lahko izogonejo z različnimi mehanizmi, vključno z izboljšanjem transporta vode, zmanjšanjem listne površine in razširitvijo koreninskega sistema. Pri pojavu sušnega stresa se listne reže zaprejo, da se zmanjša vodni potencial v listih, stebli in koreninah, kar pripomore k obvladovanju sušnega stresa. V daljšem sušnem obdobju zmanjšanje vodnega potenciala ne zadostuje za vzdrževanje potrebne oskrbe z vodo. Drevesa odstranijo liste ali celotne olistane veje, da preprečijo izgubo vode zaradi transpiracije. Fiziološki odziv na sušo se razlikuje glede na drevesno vrsto. Izohidrične drevesne vrste slabo prenašajo sušo; v primeru zmanjšanja vodnega potenciala v tleh zmanjšajo stomatalno prevodnost. Pri izohidričnih vrstah lahko nastane pomanjkanje ogljika, saj se z zapiranjem listnih rež zmanjšuje proces fotosinteze. Anisohidrične vrste se uspešneje prilagodijo na sušni in temperaturni stres. Hkrati je tveganje za pomanjkanje ogljika manjše, saj listne reže ostanejo odprte.

Temperaturni stres je posledica neposrednega sončnega sevanja in visokih temperatur zraka. Odrasla drevesa so temperaturnemu stresu izpostavljena v manjši meri kot grmičevje. Kljub temu visoke temperature v bližini tal ogrožajo sadike

dreves in mlajša drevesa. Temperaturni stres vpliva na metabolizem in vitalnost dreves, izgubo celovitosti membrane, denaturacijo encimov, zmanjšanje fotosinteze in encimske aktivnosti ter tkivno nekrozo. Zaprtje listnih rež lahko pri sočasnem pojavu temperaturnega in sušnega stresa povzroči pregrevanje rastlin. V takem primeru potrebno hlajenje listov ni zagotovljeno, saj se zmanjša proces transpiracije. Mehanizmi, ki pripomorejo k obvladovanju temperaturnega stresa, vključujejo obliko in položaj listov, tj. izpostavljenost neposredni sončni svetlobi. K hlajenju dreves pripomore proces transpiracije, kar je lahko v primeru, če je ob pojavu temperaturnega stresa sočasno omejena oskrba z vodo, problematično. Za urbana drevesa ima kombinacija temperaturnega in sušnega stresa lahko kompleksne učinke, ki so odvisni od trajanja in pogostosti obeh stresov.

Pri prilagajanju na podnebne spremembe je potrebno ustrezno načrtovanje pri izbiri drevesnih vrst in lokacije sajenja glede na kategorizacijo urbanih dreves (npr. parkovna ali ulična drevesa). Fiziološki odziv posameznih drevesnih vrst na stresne dejavnike je pomemben dejavnik v procesu krajinske izbire dreves v urbanem okolju. Predvsem je pomembna zmožnost prilagoditve dreves na podnebne spremembe, kot sta sušni in temperaturni stres.

7 VIRI

- Aas, G. 2002. *Quercus robur*. In: Roloff, A., Weisgerber, H., Lang, U. M. B., Stimm, B. (ur.). *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2*.
- Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., Winnett, S. 1992. *Cooling Our Communities: A Guidebook on Tree Planting and Light-colored Surfacing*, US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Venetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., Cobb, N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 4: 660–684.
- Anderson, L. M., Mulligan, B. E., Goodman, L. S. 1984. Effects of vegetation on human response to sound. *J. Arboric.*, 10, 2: 45–49.

- Aylor, D. E. 1972. Noise reduction by vegetation and ground. *J. Acoust. Soc. Am.*, 51, 1:197–205.
- Bavcon, J., Druškovič, B., Gogala, N. 1999. Vpliv UV-B sevanja na rast in mitotsko aktivnost pri smreki (*Picea abies* (L.) Karst.). *Acta biologica Slovenica*, 42, 2: 9–16.
- Benedikz, T., Ferrini, F., García-Valdecantos, J. L., Tello, M. L. 2005. Plant Quality and Establishment. In: Konijnendijk, C., Nilsson, K., Randrup, T., Schipperijn, J. (ur.). *Urban Forests and Trees*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 232–256.
- Böll, S., Schönfeld, P., Körber, K., Herrmann, J.V. 2014. Stadtbäume unter Stress. *LWF aktuell*, 98: 4–8.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., Dreyer, E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63, 6: 625–644.
- Breunig, T., Schach, J., Brinkmeier, P., Nickel, E. 2002. Gebietsheimische Gehölze in Baden-Württemberg, Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: 91 str.
- Brown, R. D., Gillespie, T. J. 1995. Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency. New York, John Wiley & Sons Inc.: 193 str.
- Brune, M. 2016. Urban trees under climate change. Potential impacts of dry spells and heat waves in three German regions in the 2050s. Report 24. Climate Service Center Germany, Hamburg.
- Brus, R. 2012. Drevesne vrste na Slovenskem. Ljubljana, Mladinska knjiga Založba, d. d.: 406 str.
- Burk, D. 2006. Physiologische, anatomische und chemische Regulation der Wurzelwasseraufnahme bei Rotbuche, Kiefer und Birke auf zwei unterschiedlich wasserversorgten Standorten. Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen: 123 str.
- Cardelino, C. A., Chameides, W. L. 1990. Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone. *J. Geophys. Res.* 95, D9: 13971–13979.
- Claessens, H., Oosterbaan, A., Savill, P., Rondeux, J. 2010. A review of the characteristics of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and their implications for silvicultural practices. *Forestry*, 83, 2: 163–175.
- Clark, J. R. 2013. Adaptation of ash (*Fraxinus excelsior* L.) to climate change. Dissertation. Bangor University: 215 str.
- Dimoudi, A., Nikolopoulou, M. 2003. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35: 69–76.
- Doick, K., Hutchings, T. 2013. Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure. *Farnham, Forestry Commission (UK)*: 1–10.
- Dolejši, N. 2009. Kataster uporabnega drevja – pomen in uporabnost. Hortikultura – možnosti, priložnosti, prenos dobre prakse, zbornik strokovnega posveta. Šola za hortikulturo in vizualne umetnosti Celje: 66–78.
- Fischer, N. 2005. Bedeutung der Rosskastanie und das hieraus resultierende Nachfragepotential. *LWF Wissen*, 48: 41–44.
- Forman, R. T. T. 2014. *Urban ecology: science of cities*. New York, Cambridge University Press: 462 str.
- Gill, D., Magin, G., Bertram, E. 2013. *Trees and Climate Change. A guide to the factors that influence species vulnerability and a summary of adaptation options*. Cambridge, Fauna & Flora International: 16 str.
- Gilman, E. F., Watson, D. G. 1993. *Alnus glutinosa*. Common Alder¹. Fact Sheet ST-70, a series of the Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Gillner, S. 2012. Stadtbäume im Klimawandel – Dendrochronologische und physiologische Untersuchungen zur Identifikation der Trockenstressempfindlichkeit häufig verwendeter Stadtbaumarten in Dresden. Dissertation. Technische Universität Dresden: 229 str.
- Gillner, S., Bräuning, A., Roloff, A. 2014. Dendrochronological analysis of urban trees: climatic response and impact of drought on frequently used tree species. *Trees*, 28, 4: 1079–1093.
- Göbel, P., Stubbe, H., Weinert, M., Zimmermann, J., Fach, S., Dierkes, C., Kories, H., Messer, J., Mertsch, V., Geiger, W. F., Coldewey, W. G. 2004. Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions. *Journal of Hydrology*, 299: 267–28.
- Heidt, V., Neef, M. 2008. Benefits of Urban Green Space for Improving Urban Climate. In: *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests. International Perspectives*. New York, Springer: 84–96.
- Heisler, G. M. 1986. Energy savings with trees. *Journal of Arboriculture*, 12, 5: 113–125.
- Heisler, G. M., Grant, R. H., Grimmond, S., Souch, C. 1995. Urban forests' cooling our communities? *Proceedings of the Seventh National Urban Forestry Conference*. In: Kollin, C., Barratt, M. (ur.). *American Forests*, Washington, DC: 31–34.
- Herrero, A., Castro, J., Zamora, R., Delgado-Huertas, A., Querejeta, J. I. 2013. Growth and stable isotope signals associated with drought-related mortality in saplings of two coexisting pine species. *Oecologia*, 173, 4: 1613–1624.
- Hough, M. 2004. *Cities and Natural Processes: a basic for sustainability*. London, Routledge: 304 str.
- Howenstine, W. L. 1993. Urban forests as part of the whole ecosystem, in *Proceedings of the 6th National Urban Forestry Conference*. In: Kollin, C., Mahon, J., Frame,

- L. (ur.). American Forests, Washington, DC: 118–120.
- Hsiao, T. C. 1973. Plant Responses to Water Stress. Annual Review of Plant Physiology, 24: 519–570.
- Huang, J., Akbari, H., Taha, H. 1990. The Wind-Shielding and Shading Effects of Trees on Residential Heating and Cooling Requirements. ASHRAE Winter Meeting, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, Georgia.
- Huber, G. 2010. Allgemeine Verbreitung und Ökologie der Schwarzpappel. LWF Wissen, 64: 9–14.
- Jaffe, M., Zellner, M., Minor, E., Gonzalez-Meler, M., Conter, L., Massey, D., Ahmed, H., Elberts, M., Sprague, H., Wise, S., Miller, B. 2010. Using Green Infrastructure to Manage Urban Stormwater Quality: A Review of Selected Practices and State Programs: A Report to the Illinois Environmental Protection Agency: 146 str.
- Jančar, M. 2001. Ljubljana, mesto v zelenju. Radovljica: 235 str.
- Jones, H. G. 2014. Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology 3rd ed. Cambridge, Cambridge University Press: 407 str.
- Kaplan, G. 2019. Presoja vloge zelenih in pozidanih površin pri zmanjševanju učinkov površinskega mestnega toplotnega otoka na podlagi podatkov daljinskega zaznavanja. Urbani izziv, 30, 2: 40–47.
- Kleerekoper, L., van Esch, M., Salcedo, T. B. 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. Resources, Conservation and Recycling, 64: 30–38.
- Koller, S., Holland, V., Brüggemann, W. 2013. Effects of drought stress on the evergreen *Quercus ilex* L., the deciduous *Q. robur* L. and their hybrid *Q. × turneri* Willd. Photosynthetica, 51, 4: 574–582.
- Komac, B., Ciglič, R., Pavšek, M. 2017. Naravne nesreče v mestih – primer mestnega toplotnega otoka. In: Zorn, M., Komac, B., Ciglič, R., Tičar, J. (ur.). Trajnostni razvoj mest in naravne nesreče. Ljubljana: Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: 51–67.
- Kramer, P. J., Kozlowski, T. T. 1979. Physiology of Woody Plants, Academic Press, New York.
- Kuttler, W. 2008. The Urban Climate - Basic and Applied Aspects. In: Marzluff, J. M., Shulenberger, E., Endlicher, W., Alberti, M., Bradley, G., Ryan, C., ZumBrunnen, C., Simon, U. (ur.). Urban Ecology. An International Perspective on the Interaction Between Humand and Nature. New York, Springer: 233–248.
- Larcher, W. 2001. Ökophysiologie der Pflanzen 6th ed. Stuttgart, UTB: 408 str.
- Lenschow, D. H. 1986. Probing the Atmospheric Boundary Layer, American Meteorological Society, Boston, MA.
- Malenšek, T. 2020. Mestni toplotni otok Novega mesta pozimi 2019/2020. Zaključna seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo: 41 str.
- Marion, L., Praznik, N., Pirnat, P. 2009. Smernice na načrtovanje, nego (vzdrževanje) in zaščito dreves na gradbiščih. V Ljubljani skrbimo za mestno drevje: 46 str.
- Marron, N., Maury, S., Rinaldi, C., Brignolas, F. 2006. Impact of drought and leaf development stage on enzymatic antioxidant system of two *Populus deltoides* × *nigra* clones. Annals of Forest Science, 63: 323–327.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., Yepez, E. 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? The New phytologist, 178, 4: 719–39.
- Memon, R. A., Leung, D. Y. C., Chunho, L. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. Journal of environmental studies, 20, 1: 120–128.
- Menke, P., Thönnessen, M., Beckröge, W., Bauer, J., Schwarz, H., Groß, W., Hiemstra, A., Schoenmaker van der Bijl, E., Tonneijk, A. E. G. 2013. Bäume und Pflanzen lassen Städte atmen: 40 str.
- Miller, R. W. 1988. Urban forestry: planning and managing urban greenspaces. New Jersey, Prentice-Hall: 404 str.
- Monclus, R., Dreyer, E., Villar, M., Delmotte, F. M., Delay, D., Petit, J., Barbaroux, C., Thiec, D., Le Bréchet, C., Brignolas, F. 2006. Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*. New Phytologist.
- Muck, P., Borchert, H., Hahn, J., Immler, T., Joos, A., Konner, M., Walentowski, H., Walter, A. 2009. Die Rotbuche – Mutter des Waldes. LWF, 69, 54–57.
- Nowak, D. J., McBride, J. R. 1992. Differences in Monterey pine pest populations in urban and natural forests, For. Ecol. Manage., 50: 133–144.
- Nowak, D. J. 2002. The effects on urban forests on the physical environment. V: Urban forests and trees. European cooperation in the field of scientific and technical research: proceedings no. 1 of COST Action E12. In: Randrup, T. B. (ur.). Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities: 22–42.
- Okolje v Sloveniji. 1998. Zakon o varstvu okolja. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za varstvo okolja.
- Percival, G. C., Keary, I. P., Al-Habsi, S. 2006. An assessment of the drought tolerance of *Fraxinus* genotypes for urban landscape plantings. Urban Forestry & Urban Greening, 5, 1: 17–27.
- Pietzarka, U., Roloff, A. 2000. *Alnus glutinosa*. In: Roloff, A., Weisgerber, H., Lang, U. M., Stimm, B. (ur.). Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2. Weinheim, Wiley-VCH: 1–16.

- Pretzsch, H., Rötzer, T., Matussek, R., Grams, T. E. E., Häberle, K. H., Pritsch, K., Kerner, R., Munch, J. C. 2014. Mixed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) stands under drought: from reaction pattern to mechanism. *Trees*, 28, 5: 1305–1321.
- Robinette, G. O. 1972. Plants/People/and Environmental Quality, USDI National Park Service, Washington, DC.
- Roloff, A. 2005. Biologie und Ökologie der Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum* L.). LWF Wissen, 48: 13–16.
- Roloff, A. 2008. Baumpflege. Stuttgart, Eugen Ulmer KG: 172 str.
- Roloff, A., Bonn, S. 2008. Klimawandel und Gehölze. Pinneberg, Bund deutscher Baumschulen (BdB): 42 str.
- Roloff, A., Grundmann, B. M. 2008. Waldbaumarten und ihre Verwendung im Klimawandel. Berlin, Landesforstanstalt Eberswalde: 16 str.
- Roloff, A., Korn, S., Gillner, S. 2009. The Climate-Species-Matrix to select tree species for urban habitats considering climate change. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8, 4: 295–308.
- Roloff, A. 2010. Bäume: Lexikon der praktischen Baumbiologie. Weinheim, Wiley-VCH: 215 str.
- Roloff, A. 2013a. Bäume in der Stadt: Besonderheiten - Funktion - Nutzen - Arten - Risiken. Stuttgart, Ulmer Eugen Verlag: 256 str.
- Roloff, A. 2013b. Baumpflege: Baumbiologische Grundlagen und Anwendung. Stuttgart (Hohenheim), Ulmer: 219 str.
- Rust, S., Roloff, A. 2004. Acclimation of crown structure to drought in *Quercus robur* L. – intra- and inter-annual variation of abscission and traits of shed twigs. *Basic Appl. Ecol.*, 5: 283–291.
- Ryan, M. G. 2011. Tree responses to drought. *Tree Physiology*, 31, 3: 237–239.
- Schirmer, R., Stimm, B. 1999. *Salix alba*. In: Roloff, A., Weisgerber, H., Lang, U. M., Stimm, B. (ur.). Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2. Weinheim, Wiley-VCH: 1–16.
- Schmidt, O. 2014. »Urban Forestry« – Chance für die Forstwirtschaft. LWF aktuell, 98: 9–11.
- Schmidt, C., Roloff, A. 1996. *Aesculus hippocastanum*. In: Roloff, A., Weisgerber, H., Lang, U. M., Stimm, B. (ur.). Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2. Weinheim, Wiley-VCH: 1–10.
- Schönfeld, P., Böll, S., Körber, K., Herrmann, J. V. 2011. Stadtbaumarten im Klimawandel - Projekt "Stadtgrün 2021". Veitshöchheim, LWG: 14 str.
- Schulze, E. D., Beck, E., Müller-Hohenstein, K. 2005. *Plant Ecology*. Berlin, Heidelberg, Springer: 692 str.
- Siewniak, M., Kusche, D. 2009. Baumpflege heute. Hannover, Patzer: 268 str.
- Smith, W. H. 1990. *Air Pollution and Forests*, Springer-Verlag, New York.
- Stöhr, A. 2003. Der Wasserhaushalt von *Fraxinus excelsior* und *Acer pseudoplatanus* in einem Eschen-Ahorn-Schluchtenwald. Dissertation. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf: 188 str.
- Stöhr, A., Lösch, R. 2004. Xylem sap flow and drought stress of *Fraxinus excelsior* saplings. *Tree Physiology*, 24: 169–180.
- Souch, C. A., Souch, C. 1993. The effect of trees on summertime below canopy urban climates: A case study, Bloomington, Indiana. *J. Arboric.*, 19, 5: 303–312.
- Šiftar, A., Maljevac, T., Simoneti, M., Bavcon, J. 2017. Mestno drevje. Botanični vrt, Oddelek za biologijo, Biotehnična fakulteta, Univerza v Ljubljani: 207 str.
- Trees for People. 2014. U. S. Department of Agriculture, Urban and Community Forestry. <http://www.fs.fed.us/ucf/treesforpeople.shtml> (avgust, 2020).
- Türk, W. 1999. Die Weiden der Auen und ihre Pflanzengesellschaften. LWF Wissen, 24: 1–8.
- Urli, M., Lamy, J. B., Sin, F., Burlett, R., Delzon, S., Porté, A. J. 2014. The high vulnerability of *Quercus robur* to drought at its southern margin paves the way for *Quercus ilex*. *Plant Ecology*, 216, 2: 177–187.
- Van Druff, L. W., Leedy, D. L., Stearns, F. W. 1995. Urban wildlife and human well-being, in *Urban Ecology as the Basis of Urban Planning*. In: Sukopp, H., Numata M., Huber, A. (ur.). Amsterdam, SPB Academic Publishing: 203–211.
- Vilhar, U. 2016. Urbani gozdovi in voda. <https://efuf2016.wordpress.com/urbani-gozdovi-in-voda/> (avgust, 2020).
- Walentowski, H., Ewald, J. 2003. Die Rolle der Schwarzerle in den Pflanzengesellschaften Mitteleuropas. LWF Wissen, 42: 11–19.
- Weisgerber, H. 1999. *Populus nigra*. In: Roloff, A., Weisgerber, H., Lang, U. M., Stimm, B. (ur.). Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2. Weinheim: Wiley-VCH: 1–18.
- Wittig, R. 2008. *Siedlungsvegetation*. Stuttgart, Ulmer: 252 str.
- Worrall, J. J., Adams, G. C., Tharp, S. C. 2010. Summer heat and an epidemic of cytospora canker of *Alnus*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 32, 3: 376–386.
- Zapater, M., Bréda, N., Bonal, D., Pardonnet, S., Granier, A. 2013. Differential response to soil drought among co-occurring broad-leaved tree species growing in a 15- to 25- year-old mixed stand. *Annals of Forest Science*, 70, 1: 31–39.
- Zinauer, L., Bejo, K. 2020. Sprehod po Praških vrtovih z društvom SVZ. <http://www.hortikultura-mb.si/drevesa-in-zimsko-soljenje.html> (avgust, 2020).