

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Plesničar, L., 2015. Meritve in izračun izhlapevanja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Brilly, M.): 43 str.

Datum arhiviranja: 02-06-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Plesničar, L., 2015. Meritve in izračun izhlapevanja. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Brilly, M.): 43 p.

Archiving Date: 02-06-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO

Kandidatka:

LEJA PLESNIČAR

MERITVE IN IZRAČUN IZHLAPEVANJA

Diplomska naloga št.: 40/B-VOI

**MEASUREMENT AND CALCULATION OF
EVAPORATION**

Graduation thesis No.: 40/B-VOI

Mentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Somentor:

prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 27. 05. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Leja Plesničar, izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »**Meritve in izračun izhlapevanja**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, maj 2015.

Leja Plesničar

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 551.573:556.13(497.4)(043.2)
Avtor: Leja Plesničar
Mentor: doc. dr. Mojca Šraj
Somentor: prof. dr. Mitja Brilly
Naslov: Meritve in izračun izhlapevanja
Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 43 str., 16 sl., 2 pregl., 21 graf.
Ključne besede: izhlapevanje, evapotranspiracija, FAO Penman-Monteith, Thornthwait, evaporimeter »A«

Izвлеček

V diplomski nalogi so predstavljene tri izbrane metode merjenja in izračuna evapotranspiracije na raziskovalni ploskvi na Hajdrihovi 28 in sicer merjenje z evaporacijsko posodo A ter izračun potencialne evapotranspiracije z dvema empiričnima enačbama: FAO Penman-Monteithovo enačbo in Thornthwaitovo enačbo.

Dobljene rezultate vseh treh metod smo med seboj primerjali, izračunane vrednosti po FAO Penman-Monteithovi enačbi pa smo primerjali tudi z izračuni na ARSO-vi meteorološki postaji Ljubljana-Bežigrad. Rezultati so pokazali, da so med metodami precejšnje razlike. Najmanjše vrednosti smo dobili z meritvami z evaporacijsko posodo, nekoliko višje po enostavni Thornthwaitovi enačbi, najvišje pa po FAO Penman-Monteithovi enačbi.

Analiza vplivnih dejavnikov je pokazala, da je na raziskovalni ploskvi najvplivnejši dejavnik na evapotranspiracijo sončno sevanje, sledi mu relativna vlažnost, nekoliko manjši vpliv pa imata temperatura in veter.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 551.573:556.13(497.4)(043.2)
Author: Leja Plesničar
Supervisor: assist. prof. Mojca Šraj, Ph.D.
Cosupervisor: prof. Mitja Brilly, Ph.D.
Title: Measurement and calculation of evaporation
Document type: Graduation thesis – University studies
Notes: 43 p., 16 fig., 2 tabl., 21 graph.
Keywords: evaporation, evapotranspiration, FAO Penman-Monteith, Thornthwait, evaporation pan type »A«

Abstract

The thesis presents three selected methods of measurement and calculation of the evapotranspiration on research plot at Hajdrihova 28 in Ljubljana. First method is measurement by evaporation pan type A and the other two methods are empirical equations for potential evapotranspiration calculation: FAO Penman-Monteith equation and Thornthwait equation.

The results obtained for all three methods are compared with each other. Calculated results according to the FAO Penman-Monteith equation were compared also to those from Slovenian Environment Agency meteorological station Ljubljana-Bežigrad. The results showed considerable differences between methods. The lowest values were obtained with the measurement by evaporation station type A, slightly higher values were calculated by simple Thornthwait equation and the highest by FAO Penman-Monteith equation.

Analysis of the influential factors showed that on the research plot the most influential factor is solar radiation, followed by relative humidity. Lower impact is shown by air temperature and wind speed.

ZAHVALA

Za pomoč in usmeritve pri izdelavi diplomske naloge se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj, za pomoč pri opravljanju meritev in prenosu podatkov iz podatkovnih pomnilnikov pa se zahvaljujem asistentoma Nejcu Bezaku in Mateju Sečniku.

Posebna zahvala gre moji družini za vso podporo in spodbude tekom študija in seveda tebi Jure in tvoji družini, vsem ker ste verjeli vame.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 EVAPOTRANSPIRACIJA	3
2.1 Izhlapevanje	3
2.2 Transpiracija	3
2.3 Predstavitev različnih pojmov evapotranspiracije	4
2.3.1 Potencialna evapotranspiracija (ET)	4
2.3.2 Referenčna evapotranspiracija (ET ₀)	4
2.3.3 Evapotranspiracija rastline pod standardnimi pogoji (ET _c)	4
2.3.4 Dejanska evapotranspiracija	5
2.4 Faktorji, ki vplivajo na evapotranspiracijo	5
2.5 Evapotranspiracija v Sloveniji	5
2.6 Metode merjenja evapotranspiracije	6
3 METODE	7
3.1 Merjenje evapotranspiracije	7
3.1.1 Evaporimeter »A«	7
3.1.1.1 Kljukasto merilo	7
3.1.1.2 Dolivanje vode do merske točke	8
3.1.1.3 Avtomatsko merjenje	8
3.1.1.4 Anemometer	9
3.1.1.5 Ombrograf	10
3.2 Izračun referenčne evapotranspiracije (ET ₀)	10
3.2.1 Izračun referenčne evapotranspiracije s pomočjo evaporimetra »A«	10
3.2.2 FAO Penman-Monteithova enačba (kombinirana metoda).....	12
3.2.2.1 Opis spremenljivk FAO Penman – Monteithove enačbe	12
3.2.3 Thornthwaitova enačba (temperaturna metoda).....	18
3.2.3.1 Opis spremenljivk Thornthwaitove enačbe.....	18
4 MERITVE IN IZRAČUN REFERENČNE EVAPOTRANSPIRACIJE ZA MERSKO POSTAJO NA HAJDRIHOVI ULICI V LJUBLJANI	20
4.1 Opis raziskovalne ploskve	20
4.2 Podatki	21

4.2.1	Evaporimeter »A«	21
4.2.2	Empirični enačbi FAO Penman–Monteith in Thornthwait	22
5	REZULTATI	23
5.1	Evaporimeter »A«	23
5.1.1	Rezultati za maj 2014	24
5.1.2	Rezultati za junij 2014.....	25
5.1.3	Rezultati za julij 2014.....	26
5.2	FAO Penman-Monteithova enačba	27
5.2.1	Rezultati za maj 2014	27
5.2.2	Rezultati za junij 2014.....	28
5.2.3	Rezultati za julij 2014.....	29
5.3	Thornthwaitova enačba	30
6	PRIMERJAVA REZULTATOV IN ANALIZA	31
6.1	Primerjava vrednosti referenčne evapotranspiracije pridobljenih z evaporimetrom »A«, s FAO Penman-Monteithovo enačbo in Thornthwaitovo enačbo ter ARSO-vo najbližjo meteorološko postajo	31
6.1.1	Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije izračunane po FAO Penman-Monteithovi metodi	31
6.1.2	Primerjava različnih metod določitve referenčne evapotranspiracije za raziskovalno ploskev na Hajdrihovi ulici	32
6.2	Vpliv posameznih dejavnikov na evapotranspiracijo	34
6.2.1	Odvisnost evapotranspiracije od povprečne dnevne temperature zraka	35
6.2.2	Odvisnost evapotranspiracije od globalnega sončnega sevanja	36
6.2.3	Odvisnost evapotranspiracije od relativne vlage	37
6.2.4	Odvisnost evapotranspiracije od hitrosti vetra.....	38
7	ZAKLJUČKI	40
VIRI	42

KAZALO SLIK

Slika 1: Hidrološki krog.....	1
Slika 2: Shematičen prikaz prereza lista.....	3
Slika 3: Enačba za izračun potrebne količine vode za namakanje rastlin	4
Slika 4: Povprečna letna količina referenčne evapotranspiracije izražena v mm za nekaj izbranih krajev	5
Slika 5: Različne metode merjenja evapotranspiracije	6
Slika 6: Evaporacijska posoda tipa A	7
Slika 7: Kljukasto merilo	8
Slika 8: Instrument za natančno merjenje vodne gladine.....	8
Slika 9: Instrument za natančno merjenje vodne gladine in dežemer	9
Slika 10: Anemometer.....	9
Slika 11: Ombrograf	10
Slika 12: Primera postavitve evaporacijske posode tipa A.....	11
Slika 13: Piranometri.....	14
Slika 14: Prikaz lokacije izbrane raziskovalne ploskve na Hajdrihovi ulici.....	20
Slika 15: Evaporacijska postaja na Hajdrihovi ulici	20
Slika 16: Meteorološka postaja Ljubljana-Bežigrad	21

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Faktorji, ki vplivajo na evapotranspiracijo	5
Preglednica 2: Koeficient posode glede na primer postavitve, razdaljo vetrišča, hitrost vetra in relativno vlago	11

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Dolgoletno povprečje potencialne evapotranspiracije v Ljubljani 1971-2000.....	6
Grafikon 2: Primerjava ročnih in avtomatskih meritev gladin v evaporacijski posodi v obdobju maju - julij 2014	24
Grafikon 3: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu maju pridobljene z evapormetrom »A«	24
Grafikon 4: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juniju pridobljene z evapormetrom »A«	25
Grafikon 5: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juliju pridobljene z evapormetrom »A«	26
Grafikon 6: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu maju izračunane s FAO Penman-Monteithovo enačbo	28
Grafikon 7: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juniju izračunane s FAO Penman-Monteithovo enačbo	29
Grafikon 8: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juliju izračunane s FAO Penman-Monteithovo enačbo	29
Grafikon 9: Mesečne vrednosti evapotranspiracije izračunane s pomočjo Thornthwaitove enačbe	30
Grafikon 10: Primerjava ARSO-vih podatkov o referenčni evapotranspiraciji za leto 2014 z dolgoletnim povprečjem (1971-2000)	31
Grafikon 11: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije med izbranimi lokacijama, pridobljenih s FAO Penman-Monteithovo enačbo	32
Grafikon 12: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije evapormetra »A« in FAO Penman-Monteitha	33
Grafikon 13: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije pridobljene z različnimi metodami za raziskovalno ploskev na Hajdrihovi ulici	34
Grafikon 14: Odvisnost evapotranspiracije od povprečne dnevne temperature	35
Grafikon 15: Vpliv povprečne dnevne temperature na evapotranspiracijo za mesec maj 2014	35
Grafikon 16: Odvisnost evapotranspiracije od globalnega sončnega sevanja	36
Grafikon 17: Vpliv globalnega sončnega sevanja na evapotranspiracijo za mesec maj 2014	37
Grafikon 18: Odvisnost evapotranspiracije od relativne vlage	37
Grafikon 19: Vpliv relativne vlage na evapotranspiracijo za mesec maj 2014.....	38
Grafikon 20: Odvisnost evapotranspiracije od povprečne dnevne hitrosti vetra na višini 2 m od tal	38

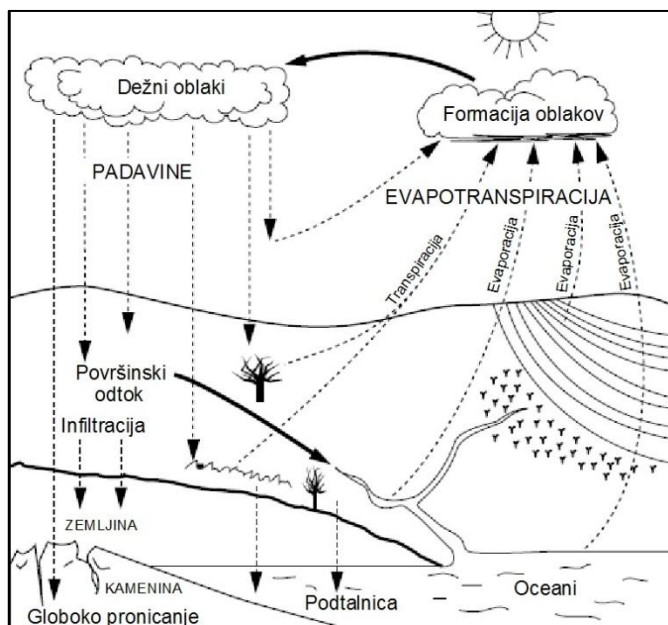
Grafikon 21: Vpliv povprečne dnevne hitrosti vetra na evapotranspiracijo za mesec maj 2014

..... 39

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Zemljina hidrosfera vsebuje kar $1,4 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$ vode (Hidrosfera, 2015). Ta količina vode na Zemlji je neprestano v gibanju in to gibanje imenujemo hidrološki krog. Med pomembnejše procese hidrološkega kroga spadata tudi izhlapevanje (evaporacija) in transpiracija (slika 1). Skupen proces obeh imenujemo evapotranspiracija, ki predstavlja celoten proces prehajanja tekoče vode s površine Zemlje v atmosfero (Brilly in Šraj, 2005). Izhlapevanje poteka s površine tal, prostih vodnih površin in površine rastlin (prestrežene padavine). Transpiracija pa je fiziološki proces prehoda vode skozi listne reže rastline v atmosfero.



Slika 1: Hidrološki krog (povzeto po: WMO, 1994)

V hidrološkem smislu evapotranspiracija predstavlja vodne izgube. Poznavanje količine evapotranspiracije je pomembno za ugotavljanje vodne bilance. Ocena evapotranspiracije je pomembna predvsem za območja, kjer so zaloge vode omejene. Tako se podatek o evapotranspiraciji pogosto uporablja v kmetijstvu za zagotavljanje ustreznih količin vode za namakanje.

Na količino izhlapevanja vplivajo klimatski dejavniki, okoljski pogoji in lastnosti rastline (Allen in sod., 1998). Količina izhlapevanja je odvisna predvsem od klimatskih pogojev in se spreminja glede na dane pogoje. Med glavne klimatske dejavnike spadajo temperatura zraka, sončno sevanje, vlažnost zraka in veter. Zato je seveda količina evapotranspiracije pogojena predvsem z geografsko lego oz. klimatskimi pasovi. V svetovnem merilu je najnižja stopnja izhlapevanja v puščavah, najvišja pa v tropskem pasu (Cesar, 2011). Večina izhlapevanja na Zemljini obli pa se zgodi nad oceani.

Tudi v Sloveniji se količina evapotranspiracije razlikuje glede na geografsko lego meteoroloških postaj in klimatske značilnosti. Cesar (2011) je v svoji nalogi, kjer je analizirala potencialno evapotranspiracijo na meteoroloških postajah Portorož, Ljubljana, Murska Sobota in Kredarica ugotovila, da je količina izhlapevanja največja na postaji Portorož, najmanjša pa na Kredarici. Postaji Ljubljana in Murska Sobota sta nekje vmes in obe izkazujeta zelo podobno količino izhlapevanja. Pričakovano je najvišje izhlapevanje v Sloveniji v poletnih mesecih in najmanjše v zimskih.

Namen diplomske naloge je predstaviti proces evapotranspiracije, postopek merjenja izhlapevanja s pomočjo evaporimetra »A« in tri izbrane metode izračuna referenčne evapotranspiracije. V ta namen so bile izvedene meritve izhlapevanja na Hajdrihovi 28 v Ljubljani in narejeni izračuni potencialne evapotranspiracije po dveh empiričnih metodah za obdobje meritev. V zadnjem delu naloge primerjava rezultatov izbranih metod, analiza vplivnih dejavnikov na evapotranspiracijo in primerjava meritev z ARSO-vimi podatki najbližje meteorološke postaje.

2 EVAPOTRANSPIRACIJA

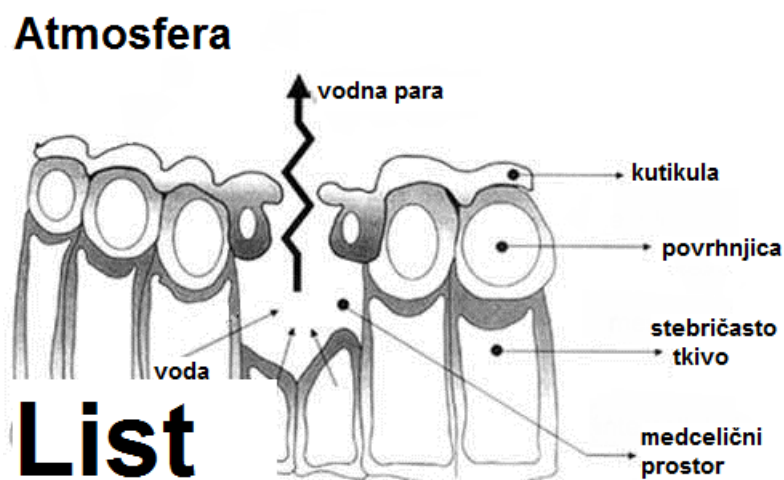
Evapotranspiracija je proces sestavljen iz dveh komponent: izhlapevanja oz. evaporacije in transpiracije (Allen in sod., 1998).

2.1 Izhlapevanje

Izhlapevanje oz. evaporacija je proces spreminjanja vode iz tekočega v plinasto stanje in difuzija le tega v atmosfero. Ta proces se izvrši ob pogoju prisotnosti vode v tekočem stanju in zadostne količine energije, pridobljene iz atmosfere ali sonca, ki je odvisna od klimatskih razmer lokacije. Izhlapevanje je odvisno tudi od letnega časa in sicer v zimskem času je izhlapevanje manjše zaradi pomanjkanja zadostne količine energije, medtem, ko pride v poletnem času do viška energije, zato je tudi izhlapevanje bolj izrazito (Davie, 2008).

2.2 Transpiracija

Ward in Trimble (2004) navajata, da je transpiracija v osnovi fiziološki proces izhlapevanja vode iz listov rastlin skozi listne reže v atmosfero (slika 2).



Slika 2: Shematičen prikaz prereza lista (povzeto po: Allen in sod., 1998)

Na sliki 2 je shematično prikazan prerez lista. Na zgornji in spodnji strani je povrhnjica, katera je zaščitena s kutikolo, ki je na atmosferski strani običajno vodoneprepustna. Tako se lahko na atmosferski strani lista ob padavinah pojavi čisto izhlapevanje iz vodne površine, kar pa ne smemo razumeti kot transpiracijo (Ward in Trimble, 2004). Za pojav transpiracije mora rastlina vodo najprej prečrpati preko koreninskega sistema. Od tam gre naprej po žilnem sistemu do listov, v medcelični prostor, nato pa skozi listne reže v okolje (Dodds in sod., 2005). Voda se bo iz zasičenih listov, ob kontaktu z atmosfero, ki ga omogočajo listne reže, v vodno paro pretvorila pod pogojem, da obstaja razlika v koncentraciji vodne pare med atmosfero in vodo v listu (obstajati mora prostor v atmosferi za sprejem novih molekul vode) ter ob prisotnosti zadostne količine energije. Potrebna energija primarno izhaja iz sončnega sevanja (Ward in Trimble, 2004).

Proces izhlapevanja vode v medceličnem prostoru poveča parni tlak, kar povzroči neenak tlak med rastlino in atmosfero. To povzroči, da se para s pomočjo difuzije preko listnih rež izloči v atmosfero. Večja kot je razlika tlakov, večja bo hitrost difuzije in posledično bo tudi izhlapevanje večje (Ward in Trimble, 2004).

2.3 Predstavitev različnih pojmov evapotranspiracije

2.3.1 Potencialna evapotranspiracija (ET)

Pod pojmom potencialna evapotranspiracija se skrivajo posplošene metode določanja evapotranspiracije (Ward in Trimble, 2004).

Definicija je bila leta 1956 podana s strani Penmana in ponazarja največjo količino izhlapele vode skozi nizko zeleno vegetacijo, enake višine, pod pogojem, da je vegetacija optimalno preskrbljena z vodo ter, da v celoti meče senco na prst, tako, da ta na nobenem mestu ni neposredno izpostavljena sončnemu sevanju. Predpostavlja tudi, da so listne reže ves čas polno odprte. Ti pogoji teoretično zagotavljajo največjo možno evapotranspiracijo pod danimi klimatskimi pogoji (Ward in Trimble, 2004).

Metode za določanje potencialne evapotranspiracije sodijo med najenostavnejše, vendar pa lahko prikažejo precej nenatančne rezultate, saj opazovana območja običajno niso v celoti pokrita z dobro omočeno nizko raslo zeleno vegetacijo (Ward in Trimble, 2004). Območij s takimi pogoji je zelo malo in se nahajajo le na brežinah vodnih teles ali takoj po končanem deževju (Brilly in Šraj, 2005).

2.3.2 Referenčna evapotranspiracija (ET₀)

Pojem referenčna evapotranspiracija predstavlja izhlapevanje iz zemljine in referenčne rastline. Tipične referenčne rastline so običajno trave oz. stročnice alfalfa. Razlog za izbor teh rastlin je predvsem v tem, da s svojimi listi dobro mečejo senco na zemljino (Ward in Trimble, 2004).

Karakteristike referenčne travnate površine, ki jih potrebujemo za izračun referenčne evapotranspiracije so višina trave 0.12 m, albedo 0.23 in površinska upornost 70 s/m Brilly in Šraj, 2005.

2.3.3 Evapotranspiracija rastline pod standardnimi pogoji (ET_c)

Pojem predstavlja evapotranspiracijo za točno določeno izbrano rastlino optimalno preskrbljeno z vodo (Allen in sod., 1998).

$$ET_0 \times \text{koeficient rastline } K_c = ET_c$$

Slika 3: Enačba za izračun potrebne količine vode za namakanje rastlin (povzeto po: Allen in sod., 1998)

V sliki 3 ET₀ ponazarja referenčno evapotranspiracijo, ki je izračunana za referenčno rastlino. Na predlog FAO je za izračun referenčne evapotranspiracije priporočljiva uporaba Penman-Monteithove enačbe. Referenčno evapotranspiracijo potem pomnožimo s K_c, ki predstavlja koeficient rastline, odvisen od vrste rastline in stopnje njenega razvoja. Ponavadi ločimo štiri stopnje razvoja rastline (Pintar, 2006). Podatki o vrednosti koeficientov za posamezne rastline so največkrat tabelirani. Dobljeni rezultat ET_c predstavlja potencialno evapotranspiracijo rastline v mm/časovno enoto.

2.3.4 Dejanska evapotranspiracija

Dejanska evapotranspiracija je po priporočilih Penmana približno enaka 60 % do 80 % vrednosti potencialne evapotranspiracije. Pri tej metodi določitve evapotranspiracije se upošteva dejanska količina vode, ki preide v atmosfero iz naravnih pogojev vlage v tleh z izhlapevanjem in transpiracijo (Brilly in Šraj, 2005).

2.4 Faktorji, ki vplivajo na evapotranspiracijo

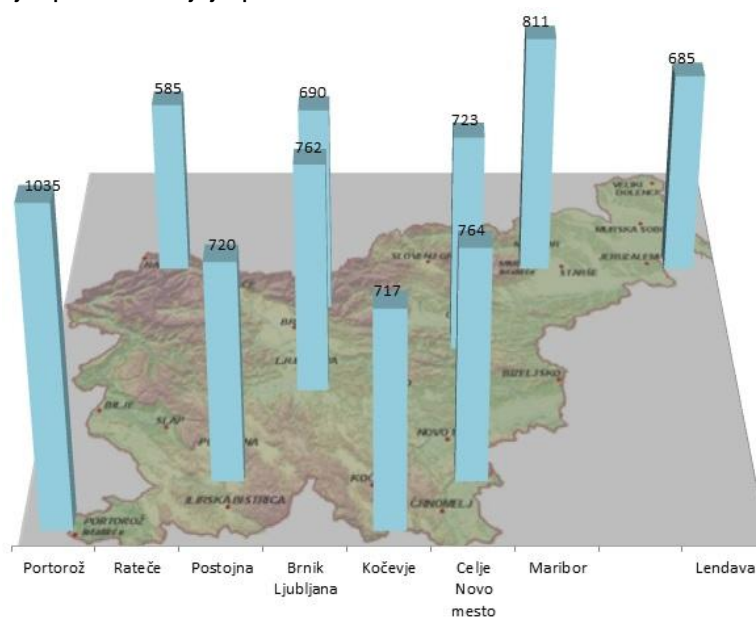
Allen in sod. (1998) v svoji knjigi navajajo tri skupine faktorjev vpliva na evapotranspiracijo, ki so predstavljeni v preglednici 1.

Preglednica 1: Faktorji, ki vplivajo na evapotranspiracijo (povzeto po: Allen in sod., 1998)

Meteorološki parametri	Okoljski pogoji
<ul style="list-style-type: none"> - Sončno sevanje - Temperatura zraka - Vlaga - Hitrost vetra 	<ul style="list-style-type: none"> - Slanost tal - Rodovitnost tal - Nепropustni sloji - Bolezni in škodljivci - Vsebnost vode v prsti
Faktorji rastline	
<ul style="list-style-type: none"> - Vrsta - Pestrost - Stopnja razvoja - Odpornost na transpiracijo - Višina 	<ul style="list-style-type: none"> - Hrapavost - Odbojnost - Tip prsti - Koreninski sistem

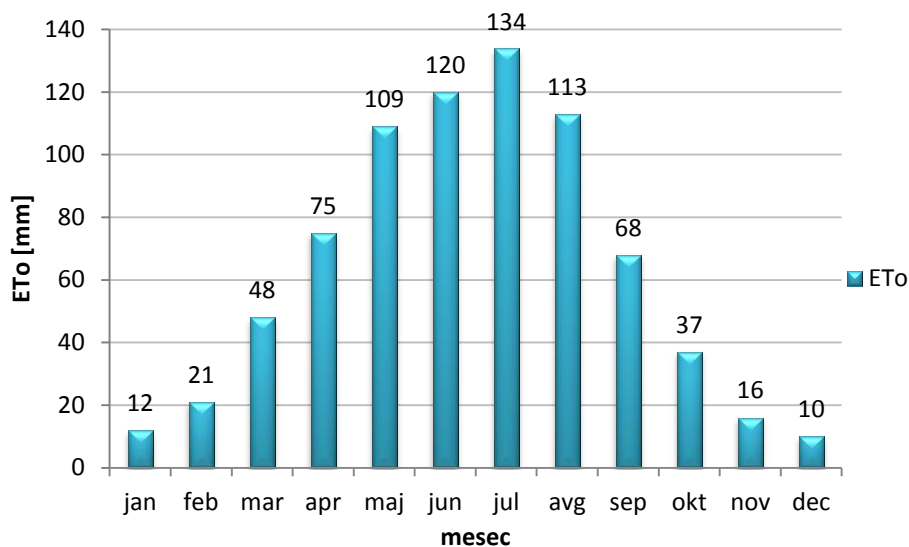
2.5 Evapotranspiracija v Sloveniji

V Sloveniji Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) beleži potencialno evapotranspiracijo že od leta 1961. Povprečna letna količina potencialne evapotranspiracije v nekaj izbranih krajih po Sloveniji je prikazana na sliki 4.



Slika 4: Povprečna letna količina referenčne evapotranspiracije izražena v mm za nekaj izbranih krajev (povzeto po: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/etp/> (27. 2. 2015.))

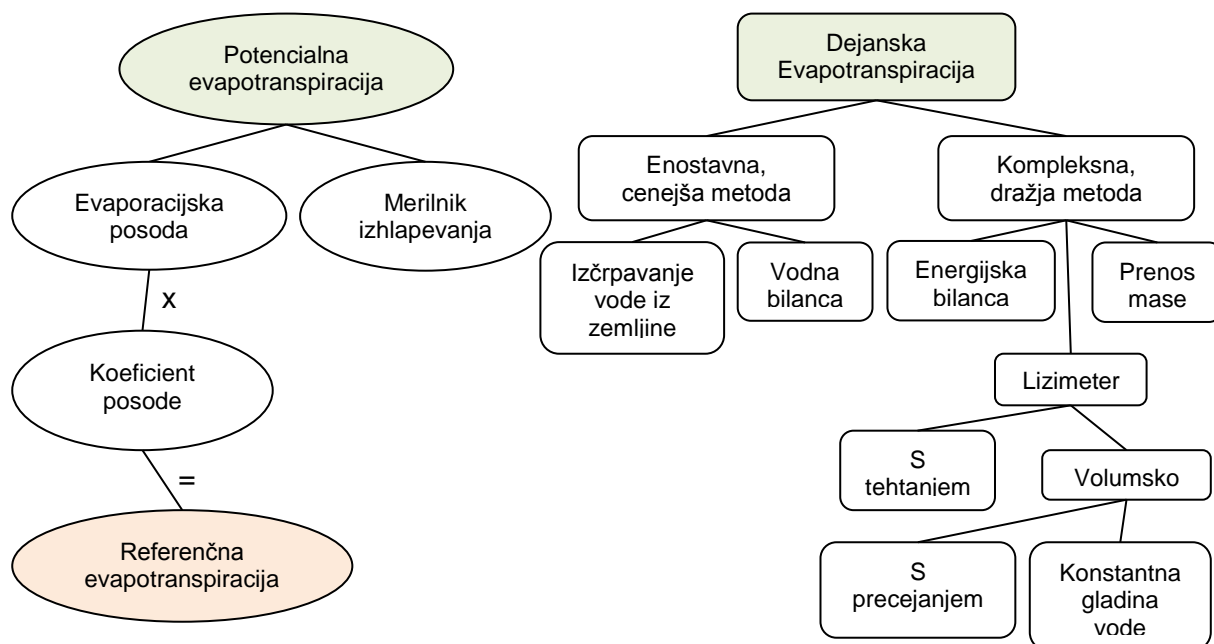
V Ljubljani znaša povprečna letna potencialna evapotranspiracija 762 mm. Najvišja je v poletnih mesecih in najnižja v zimskih (grafikon 1).



Grafikon 1: Dolgoletno povprečje potencialne evapotranspiracije v Ljubljani 1971-2000
(vir: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/period/etp/> (2. 1. 2015.))

2.6 Metode merjenja evapotranspiracije

Na sliki 5 so prikazani različni pojmi evapotranspiracije in s kakšnimi metodami jih določamo.



Slika 5: Različne metode merjenja evapotranspiracije (povzeto po: Ward in Trimble, 2004)

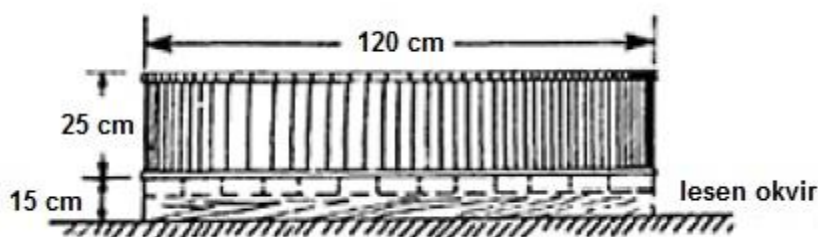
Za meritve izhlapevanja je na voljo več različnih tipov instrumentov. Zagotovo so najbolj razširjene evaporacijske posode, med katere prištevamo tudi standardiziran evaporimeter »A« (Ward in Trimble, 2004).

3 METODE

3.1 Merjenje evapotranspiracije

3.1.1 Evaporimeter »A«

Evaporimeter »A« je ime za evaporacijsko posodo, izdelano iz galvaniziranega železa ali pocinkane pločevine debeline 0,8 mm, s pomočjo katere merimo izhlapelo količino vode v atmosfero. Posoda tipa »A« je okrogla s premerom 120 cm in višine 25 cm (Allen in sod., 1998).



Slika 6: Evaporacijska posoda tipa A (Shaw, 1994)

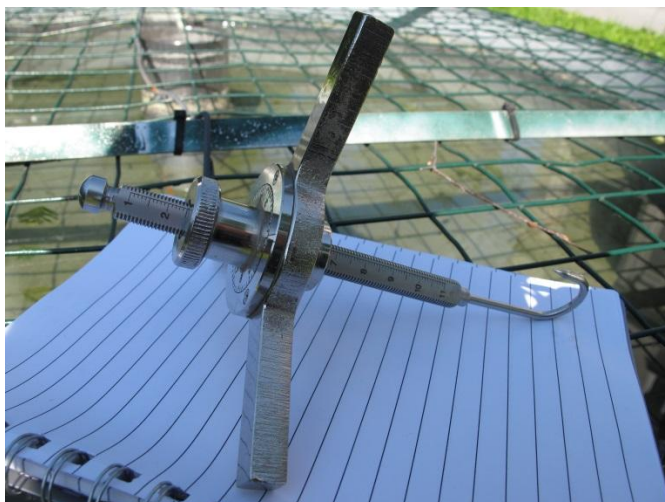
Posodo namestimo 15 cm od tal na lesen okvir (slika 6) postavljen na travnato površino tako, da lahko okoli nje zrak prosto kroži in jo uravnamo s pomočjo libele oz. vodne tehtnice. Napolnimo jo z vodo do optimalne višine 5 cm od zgornjega roba (Shaw, 1994). Vodo je priporočljivo tedensko zamenjati, da se prepreči motnost oz. ji dodati sredstvo za preprečevanje obraščanja z algami. Pokrita mora biti z mrežo, da se živalim prepreči pitje iz nje (Allen in sod., 1998).

Natančne meritve izhlapevanja lahko opravimo s pomočjo kljukastega merila in umirjevalnega kovinskega valja, nameščenega v posodi, premera 10 cm in višine 20 cm (Allen in sod., 1998).

Posodo je priporočljivo postaviti na travnato območje površine vsaj 15x15 m², pri čemer moramo paziti, da je vsaj 10 m odmaknjena od višje vegetacije oz. stavb in na privetni strani (Allen in sod., 1998).

3.1.1.1 Kljukasto merilo

Za natančno ročno odčitavanje podatkov o količini izhlapele vode iz evaporacijske posode tipa A v milimetrih na dan se uporablja kljukasto merilo. Kljukasto merilo je, kot navajajo proizvajalci zelo natančno mikrometrsko merilo običajno 10 cm skale z natančnostjo 0,02 mm (slika 7). Tako visoko natančnost lahko dosegamo le s pomočjo umirjevalnega kovinskega valja, ki preprečuje nihanje vode.



Slika 7: Kljukasto merilo (foto: Leja Plesničar, 02. 06. 2014)

Kljukasto merilo postavimo na kovinski valj in s pomočjo vrtilne osi nastavimo ost merila tako, da ost ravno prebode vodno gladino in zapišemo odčitek (Rickly, 2009).

3.1.1.2 Dolivanje vode do merske točke

Druga metoda zahteva kovinski valj z mersko ničelno točko. Z vsakim odčitkom napolnimo evaporacijsko posodo do ničelne točke s pomočjo posodice. Vodo je priporočljivo dodajati s pomočjo merilnega valja, saj tako najlažje določimo količino izhlapele vode, ki je tako enaka količini dodane vode (Rickly, 2009).

3.1.1.3 Avtomatsko merjenje

Podatek o količini izhlapele vode iz evaporacijske posode lahko pridobimo tudi s pomočjo instrumenta za avtomatsko merjenje vodne gladine (sliki 8 in 9). Natančnost instrumenta je 0,2 mm.



Slika 8: Instrument za natančno merjenje vodne gladine (vir: <http://www.unidata.com.au/products/water-monitoring-modules/precision-water-level-instrument/#prettyPhoto> (27. 2. 2015))

Ker je evaporacijska posoda pokrita le z mrežo, je izpostavljena vremenskim vplivom, zato potrebujemo, ne glede izbiro metode, za pridobitev podatka o količini izhlapele vode na dan sočasno merjenje količine padavin. Običajno se za ta namen poleg evaporacijske postaje namesti dežemer (slika 9).



Slika 9: Instrument za natančno merjenje vodne gladine in dežemer (foto: Nejc Bezak, 2014)

3.1.1.4 Anemometer

Na izbrani evaporacijski postaji se nahaja anemometer proizvajalca Rickly Hydrological Co. (slika 10).



Slika 10: Anemometer (foto: Nejc Bezak, 2014)

Glavni sestavni del anemometra so tri poloble skodelice, pritrjene na vreteno, ki se vrtili s pomočjo zobnika povezanega s števcem. Vreteno z zobnikom in števec so zaščiteni z vodo nepropustnim ohišjem, ki ima v srednjem delu okence za odčitavanje števila dogodkov. Zapis števila dogodkov je omogočen s pomočjo električnega kontakta, ki ga omogoča stikalo, kot element med zobnikom in števcem, ki deluje na osnovi magnetnega polja. Števec neprekinjeno beleži število dogodkov od 0 do 99999 in nato začne znova (Rickly, 1998).

Proizvajalec navaja naslednjo enačbo za izračun povprečne hitrosti vetra:

$$\text{Povprečna hitrost vetra} = \frac{\text{opravljena pot v izbranem časovnem intervalu}}{\text{izbran časovni interval}} \quad (1)$$

V enačbi moramo v imenovalcu število dogodkov pretvoriti v enoto metrov, izbran časovni interval pa v sekunde.

En zapisan dogodek na števcu predstavlja 53 obratov vetrnice, kar na podlagi dimenzij vetrnice, ki jih podaja proizvajalec, predstavlja opravljeno pot 33,81 m. Za časovni interval običajno izberemo 24 urno periodo, ki je skladna s pobiranjem ostalih podatkov na evaporacijski postaji. Število zabeleženih dogodkov v izbranem časovnem intervalu nato pomnožimo z opravljeno potjo enega dogodka, kar delimo z izbranim časovnim intervalom pretvorjenim v sekunde, da dobimo povprečno hitrost vetra (Bezák, N., osebna komunikacija, 2014).

3.1.1.5 Ombrograf

Za pravičen izračun evapotranspiracije potrebujemo na evaporacijski postaji tudi merilnik padavin.



Slika 11: Ombrograf (foto: Nejc Bezák, 2014)

Na sliki 11 je prikazan ombrograf proizvajalca Vaisala tipa RG13/RG13H. Ombrograf deluje na principu prekucnega mehanizma, kateri je zasnovan tako, da se vsakič, ko se levi oziroma desni prekat napolni (0,2 mm), prekucne, kar se zabeleži kot en dogodek. Število zabeleženih dogodkov v izbranem časovnem intervalu nam pove zapadlo količino dežja, ki jo moramo pri izračunu evapotranspiracije iz posode upoštevati. Ombrograf dogodke beleži s pomočjo stikala, ki deluje na osnovi magneta. Vsebuje tudi grelni element, ki omogoča merjenje padavin tudi pod 4°C (Vaisala, 2015).

3.2 Izračun referenčne evapotranspiracije (ET_0)

3.2.1 Izračun referenčne evapotranspiracije s pomočjo evaporimetra »A«

Za izračun referenčne evapotranspiracije s pomočjo evaporimetra »A« Allen in sodelavci (1998) navajajo naslednjo enačbo:

$$ET_0 = K_p \cdot E_{posode}, \quad (2)$$

v kateri je:

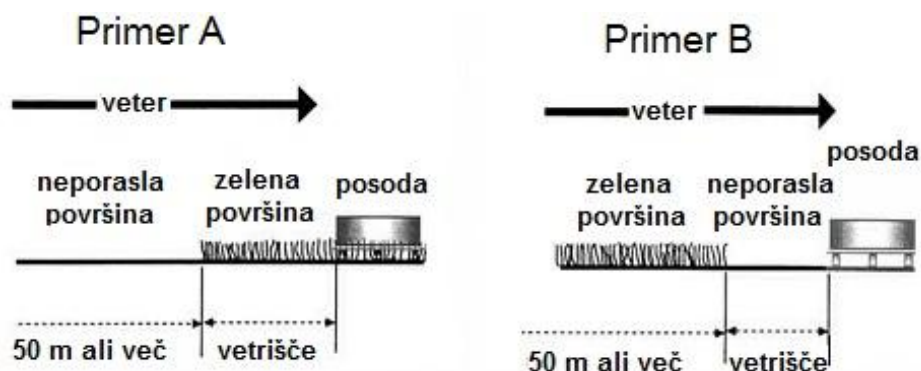
ET_0 referenčna evapotranspiracija [mm/dan],

K_p koeficient posode [-],

E_{posode} izhlapevanje posode [mm/dan].

Poznamo različne vrste posod, prav tako pa ima vsaka vrsta posode, zaradi svojih specifičnih značilnosti, kot so barva, višina in priporočila o postavitvi, tudi specifičen koeficient posode (Allen in sod., 1998).

Allen in sodelavci (1998) navajajo, da moramo pri izbiri koeficienta posode najprej pogledati kakšna je bila izbira položaja opazovane posode. Poznamo dva primera postavitve, ki sta prikazana na sliki 12.



Slika 12: Primera postavitve evaporacijske posode tipa A (povzeto po: Allen in sod., 1998)

Iz preglednice 2 izberemo primeren koeficient glede na razdaljo vetrišča in povprečno hitrost vetra ter vrednost relativne vlage na opazovanem območju.

Preglednica 2: Koeficient posode glede na primer postavitve, razdaljo vetrišča, hitrost vetra in relativno vlago (povzeto po: Allen in sod., 1998)

Evaporimeter A	Primer A				Primer B			
		nizka < 40	srednja 40 - 70	visoka > 70		nizka < 40	srednja 40 - 70	visoka > 70
→ RH povp. [%]								
Hitrost vetra [m s ⁻¹]	Širina vetrišča [m]				Širina vetrišča [m]			
Rahel	1	0.55	0.65	0.75	1	0.70	0.80	0.85
< 2	10	0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.50	0.60	0.70
Zmeren	1	0.50	0.60	0.65	1	0.65	0.75	0.80
2-5	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.70	0.80	0.80	1000	0.45	0.55	0.60

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2.

Močan	1	0.45	0.50	0.60	1	0.60	0.65	0.70
5-8	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50	0.60
	1000	0.65	0.70	0.75	1000	0.40	0.45	0.55
Zelo močan	1	0.40	0.45	0.50	1	0.50	0.60	0.65
> 8	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1000	0.55	0.60	0.65	1000	0.35	0.40	0.45

3.2.2 FAO Penman-Monteithova enačba (kombinirana metoda)

FAO Penman-Monteithova enačba predstavlja standardizirano metodo za izračun referenčne evapotranspiracije iz meteoroloških podatkov. Leta 1948 je g. Penman zapisal enačbo za izračun evaporacije z vodne površine s pomočjo kombinacije klimatoloških podatkov o soncu, temperaturi, vlagi in hitrosti vetra. Kasneje so mnogi raziskovalci Penmanovo enačbo nadgrajevali do oblike, kot jo poznamo danes in je s strani FAO – Organizacije za prehrano in kmetijstvo Združenih narodov priznana kot standardna metoda izračuna referenčne evapotranspiracije (Allen in sod., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot R_n - G + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot 1 + 0,34 \cdot u_2}, \quad (3)$$

v kateri je:

ET_0	referenčna evapotranspiracija [mm/dan],
Δ	nagib krivulje zasičenega parnega tlaka [kPa/°C],
R_n	neto sevanje na površini rastlin [MJ/m ² /dan],
G	toplotni tok tal [MJ/m ² /dan],
γ	psihrometrična konstanta [kPa/°C],
T	povprečna dnevna temperatura zraka na višini 2m [°C],
u_2	hitrost vetra na višini 2m [m/s],
e_s	zasičen parni tlak [kPa],
e_a	dejanski parni tlak [kPa],
$e_s - e_a$	deficit zasičenega parnega tlaka [kPa].

Če želimo zagotoviti pravilnost rezultatov enačbe, je priporočljivo vremenske podatke zajemati na višini 2 m (oz. jih pretvoriti na to višino).

3.2.2.1 Opis spremenljivk FAO Penman – Monteithove enačbe

Krivulja zasičenega parnega tlaka (Δ)

Za izračun evapotranspiracije potrebujemo razmerje med zasičenim parnim tlakom in temperaturo, katerega nam Allen in sodelavci (1998) podajo z naslednjo enačbo:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot 0,6108 \cdot \exp \frac{17,27 \cdot T}{T+237,3}}{T+237,3^2}, \quad (4)$$

v kateri je:

Δ nagib krivulje zasičenega parnega tlaka pri temperaturi zraka T [kPa/°C],
 T temperatura zraka [°C].

Neto sevanje (R_n)

Neto sevanje je razlika med neto kratkovalovnim sončnim sevanjem, ki ga Zemljina površina sprejme - R_{ns} in neto dolgovalovnim sevanjem, ki ga Zemlja odda nazaj v atmosfero - R_{nl} (Allen in sod., 1998):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}, \quad (5)$$

v kateri je:

R_n neto sevanje [MJ/m²/dan],
 R_{ns} sončno oziroma kratkovalovno sevanje [MJ/m²/dan] (enačba (6)),
 R_{nl} dolgovalovno sevanje [MJ/m²/dan] (enačba (7)).

Sončno oziroma kratkovalovno sevanje (R_{ns})

Kratkovalovno sevanje izhaja iz razmerja med prejetim in odbitim sončnim sevanjem (Allen in sod., 1998):

$$R_{ns} = 1 - \alpha \cdot R_s, \quad (6)$$

v kateri je:

R_{ns} neto sončno oziroma kratkovalovno sevanje [MJ/m²/dan],
 α refleksijski koeficient oziroma albedo, ki je za hipotetično referenčno travnato površino enak 0,23,
 R_s globalno sončno sevanje [MJ/m²/dan].

Prejeto sončno oziroma globalno sevanje (R_s)

Globalno sončno sevanje je sevanje, ki pade na vodoravno Zemljino površino. Njegova energija je odvisna od oblačnosti, vlage, prepustnosti ozračja za sevanje in lokacije merjenja. Merimo ga s piranometri (ARSO, 2014b). Običajno podatek o globalnem sevanju pridobimo iz najbližje merilne postaje.



Slika 13: Piranometri (Vir:

http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/Energija_soncnega_obsevanja.pdf, Pridobljeno 14. 3. 2015)

Dolgovalovno sevanje (R_{nl})

Pretok dolgovalovne energije, ki jo odda Zemljino površje je enak absolutni temperaturi površja povišani za štirikrat. To razmerje s količinami izraža Stefan-Boltzmanov zakon (Allen in sod., 1998):

$$R_{nl} = \sigma \cdot \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \cdot 0,34 - 0,14 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} \cdot 1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35, \quad (7)$$

v kateri je:

- R_{nl} neto oddano dolgovalovno sevanje [$MJ/m^2/dan$],
- σ Stefan-Boltzmanova konstanta [$4,903 \times 10^{-9} MJ/K^4/m^2/dan$],
- $T_{max,K}$ maksimalna absolutna temperatura med 24-urno periodo [$K = ^\circ C + 273,16$],
- $T_{min,K}$ minimalna absolutna temperatura med 24-urno periodo [$K = ^\circ C + 273,16$],
- e_a dejanski parni tlak [kPa] (enačba (8)),
- R_s/R_{so} relativna kratkovalovna radiacija (omejena na ≤ 1),
- R_s globalno sončno sevanje [$MJ/m^2/dan$],
- R_{so} izračunana radiacija jasnega neba [$MJ/m^2/dan$] (enačba (16)).

Dejanski parni tlak (e_a)

Dejanski parni tlak lahko izračunamo s pomočjo podatka o relativni vlažnosti. V primeru, ko lahko pridobimo le podatek o povprečni relativni vlagi RH_{mean} , dejanski parni tlak izračunamo po naslednji enačbi (Allen in sod., 1998):

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} \cdot \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2}, \quad (8)$$

v kateri je:

- e_a dejanski parni tlak [kPa],
- RH_{mean} povprečna relativna vlaga [%],
- $e^0(T_{max})$ zasičen parni tlak pri maksimalni dnevni temperaturi T [kPa] (enačba (10)),
- $e^0(T_{min})$ zasičen parni tlak pri minimalni dnevni temperaturi T [kPa] (enačba (11)).

Srednja vrednost zasičenega parnega tlaka (e_s)

Zaradi nelinearnosti enačbe za izračun zasičenega parnega tlaka (enačbi (10) in (11)), srednjo vrednost zasičenega parnega tlaka za dnevna, tedenska ali mesečne obdobja računamo kot povprečje zasičenega parnega tlaka pri maksimalni in minimalni dnevni temperaturi za določeno obdobje (Allen in sod., 1998):

$$e_s = \frac{e^0 T_{max} + e^0 T_{min}}{2}, \quad (9)$$

v kateri je:

- e_s srednja vrednost zasičenega parnega tlaka [kPa],
- $e^0(T_{max})$ zasičen parni tlak pri maksimalni dnevni temperaturi [kPa] (enačba (10)),
- $e^0(T_{min})$ zasičen parni tlak pri minimalni dnevni temperaturi [kPa] (enačba (11)).

Uporaba srednje vrednosti zasičenega parnega tlaka pri izračunu evapotranspiracije povečuje natančnost izračuna (Allen in sod., 1998).

Zasičen parni tlak pri maksimalni dnevni temperaturi – $e^0(T_{max})$

$$e^0 T_{max} = 0,6108 \cdot \exp \frac{17,27 \cdot T_{max}}{T_{max} + 237,3}, \quad (10)$$

v kateri je:

- $e^0(T_{max})$ zasičen parni tlak pri maksimalni dnevni temperaturi T [kPa],
- T_{max} maksimalna dnevna temperatura zraka [°C].

Zasičen parni tlak pri minimalni dnevni temperaturi – $e^0(T_{min})$

$$e^0 T_{min} = 0,6108 \cdot \exp \frac{17,27 \cdot T_{min}}{T_{min} + 237,3}, \quad (11)$$

v kateri je:

- $e^0(T_{min})$ zasičen parni tlak pri minimalni dnevni temperaturi T [kPa],
- T_{min} minimalna dnevna temperatura zraka [°C].

Ekstraterestično sevanje za posamezen dan (R_a)

Ekstraterestično sevanje je sončno sevanje na robu atmosfere in je odvisno od kota med smerjo sončnih žarkov in Zemljine površine. Tekom leta se seveda spreminja in je za vsako lokacijo na Zemlji drugačno. Zapišemo ga z naslednjo enačbo:

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot \omega_s \cdot \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s, \quad (12)$$

v kateri je:

- R_a ekstraterestično sevanje za dnevne periode [MJ/m²/dan],
- G_{sc} sončeva konstanta [0,0820 MJ/m²/min],
- d_r relativna inverzna razdalja Zemlja – Sonce (enačba (13)),
- ω_s kot sončnega zahoda [rad] (enačba 14),

φ zemljepisna širina [rad],
 δ sončni odklon [rad] (enačba (15)).

Relativna inverzna razdalja med Zemljo in Soncem (d_r) se izračuna kot:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{2\pi}{365} \cdot J , \quad (13)$$

v kateri je:

d_r relativna inverzna razdalja Zemlja – Sonce [-],
 J dan v letu med 1 in 365 (oziroma 366).

Kot sončnega zahoda (ω_s) pa izračunamo po enačbi:

$$\omega_s = \arccos -\tan \varphi \tan \delta , \quad (14)$$

v kateri je:

ω_s kot sončnega zahoda [rad].

Sončni odklon (δ) pa izračunamo po enačbi:

$$\delta = 0,409 \cdot \sin \frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39 , \quad (15)$$

v kateri je:

δ sončni odklon [rad].

Izračunana radiacija jasnega neba (R_{so})

Sevanje ob jasnem nebu lahko izračunamo na podlagi nadmorske višine z in ekstraterestičnega sevanja za dnevne vrednosti R_a (Allen in sod., 1998):

$$R_{so} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z \cdot R_a, \quad (16)$$

v kateri je:

R_{so} izračunana radiacija jasnega neba [MJ/m²/dan],
 z nadmorska višina [m],
 R_a ekstraterestično sevanje za dnevne periode [MJ/m²/dan] (enačba (12)).

Toplotni tok tal (G)

Toplotni tok predstavlja energijo, ki je potrebna za segrevanje Zemlje. G je pozitiven, ko se Zemlja segreva in negativen, ko se le ta ohlaja. Toplotni tok je v primerjavi z neto sevanjem zelo majhen in ga pogosto lahko zanemarimo. Poznamo različne enačbe za izračun toplotnega toka za daljša in mesečna časovna obdobja, za eno- do deset-dnevne periode pa Allen in sodelavci (1998) navajajo, da je toplotni tok enak nič:

$$G_{dnevni} \approx 0, \quad (17)$$

v kateri je:

G_{dnevni} toplotni tok tal [MJ/m²/dan].

Atmosferski pritisk (P)

Atmosferski pritisk je pritisk, ki ga povzroča teža Zemljine atmosfere. Atmosferski pritisk lahko izračunamo s poenostavljeno enačbo idealnega plina, pri kateri predvidevamo, da ima atmosfera 20°C (Allen in sod., 1998):

$$P = 101,3 \cdot \frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293}^{5,26}, \quad (18)$$

v kateri je:

P	atmosferski pritisk [kPa],
z	nadmorska višina [m].

Običajno podatek o atmosferskem pritisku pridobimo iz najbližje merilne postaje.

Psihrometrična konstanta (γ)

Evaporacija je na velikih višinah povečana zaradi nižjega atmosferskega pritiska, kar v enačbah upoštevamo s psihrometrično konstanto, ki jo izračunamo s pomočjo spodnje enačbe (Allen in sod., 1998):

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda}, \quad (19)$$

v kateri je:

γ	psihrometrična konstanta [kPa/°C],
c_p	specifična toplota zraka pri konstantnem tlaku [1,013x10 ⁻³ MJ/kg/°C],
P	atmosferski pritisk [kPa],
ε	razmerje molekularne teže (vodna para / suh zrak) [0,622 -],
λ	latentna toplota uparjevanja [2,45 MJ/kg].

Povprečna temperatura zraka na višini 2 m (T)

Povprečno temperaturo merimo s pomočjo tradicionalnih ali modernih avtomatskih vremenskih postaj znotraj zavetja (meteorološke hišice), postavljene po standardih WMO (Svetovna meteorološka organizacija) na višini 2 metra od tal. Meteorološke hišice so izdelane tako, da zaščitijo inštrumente pred izpostavljenostjo neposrednega sončnega segrevanja. Povprečno temperaturo izračunamo po enačbi (Allen in sod., 1998):

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}, \quad (20)$$

v kateri je:

T_{mean}	povprečna temperatura zraka [°C],
T_{max}	maksimalna dnevna temperatura [°C],
T_{min}	minimalna dnevna temperatura [°C].

Hitrost vetra (u_2)

Allen in sodelavci (1998) navajajo, da so hitrosti vetra za različne višine nad tlemi različne. Površinsko trenje povzroča upočasnitev vetra ob površju. Iz tega razloga anemometre - inštrumente za merjenje vetra, postavljamo na določenih višinah, za potrebe meteorologije

na 10 m od tal in za potrebe agrometeorologije na višini 2 oziroma 3 m od tal. Za izračun evapotranspiracije se zahteva merjenje hitrosti vetra na višini 2 m od tal. V kolikor imamo v bližini evaporacijske posode anemometer na višini, različni od 2 m, hitrost vetra preračunamo na višino 2 m s pomočjo naslednje logaritične enačbe (Allen in sod., 1998):

$$u_2 = u_z \cdot \frac{4,87}{\ln 67,8 \cdot z - 5,42}, \quad (21)$$

v kateri je:

u_2	hitrost vetra na višini 2 m od tal [m/s],
u_z	izmerjena hitrost vetra na višini m od tal [m/s],
z	merilna višina hitrosti vetra [m].

3.2.3 Thornthwaitova enačba (temperaturna metoda)

Thornthwait je leta 1948 določil enačbo za oceno mesečne evapotranspiracije na podlagi povprečne mesečne temperature zraka in lokacije. Jensen je leta 1990 poudaril, da je Thornthwaitova enačba uporabna zgolj za območja s podobnimi klimatskimi razmerami, kot jih imajo Združene države v centralnem vzhodnem delu in nikakor ni uporabna za območja s sušnim oziroma polsušnim podnebjem. Thornthwaitova enačba ima naslednjo obliko (povzeto po Ward in Trimble, 2004):

$$E_{tp} = 16 \cdot \frac{10 \cdot T}{I}^a, \quad (22)$$

v kateri je:

E_{tp}	mesečna evapotranspiracija [mm],
T	povprečna mesečna temperatura [°C],
I	toplotni indeks [-],
a	koeficient lokacije [-].

3.2.3.1 Opis spremenljivk Thornthwaitove enačbe

Toplotni indeks (I)

Za izračun mesečne evapotranspiracije in koeficienta lokacije moramo najprej izračunati toplotni indeks (povzeto po Ward in Trimble, 2004):

$$I = \prod_{j=1}^{12} \frac{T_j}{5}^{1,514}, \quad (23)$$

v kateri je:

I	toplotni indeks [-],
T_j	povprečna mesečna temperatura za j-ti mesec za opazovano lokacijo [°C]

Koeficient lokacije (a)

Ward in Trimble (2004) navajata enačbo za izračun koeficienta lokacije:

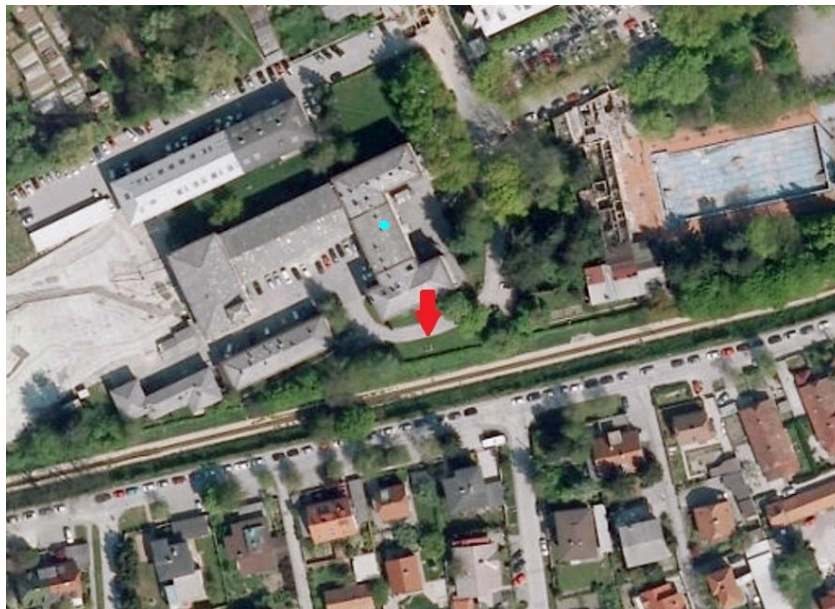
$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,792 \times 10^{-2} I + 0,49239, \quad (24)$$

v kateri je:

- a koeficient lokacije [-],
- l toplotni indeks [-].

4 MERITVE IN IZRAČUN REFERENČNE EVAPOTRANSPIRACIJE ZA MERSKO POSTAJO NA HAJDRIHOVI ULICI V LJUBLJANI

4.1 Opis raziskovalne ploskve



Slika 14: Prikaz lokacije izbrane raziskovalne ploskve na Hajdrihovi ulici

Izbrana raziskovalna ploskev je opremljena z evaporacijsko postajo s posodo tipa A na lokaciji Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Oddelka za Okoljsko gradbeništvo na Hajdrihovi ulici v Ljubljani. Postavljena je na travnati površini na južni strani stavbe.



Slika 15: Evaporacijska postaja na Hajdrihovi ulici (foto: Nejc Bezak, 2014)

Evaporacijska postaja (slika 15) vsebuje poleg evaporacijske posode tipa A še anemometer in dežemer. Opisi vseh instrumentov so podani v poglavju 3.1.1.

4.2 Podatki

4.2.1 Evaporimeter »A«

Za izračun predhodno opisanih spremenljivk enačbe za izračun evapotranspiracije (enačba (2)) s pomočjo evaporacijske posode, potrebujemo naslednje vhodne podatke:

Izhlapevanje iz posode (ET_{posode})

Ročne meritve izhlapele vode iz evaporacijske posode sem opravila s pomočjo kljukastega mikrometra, ki sem ga postavila na umirjevalni valj in vijak merila vrtela toliko časa, da se je ost merila ravno dotaknila vodne gladine. Dobljeno meritev sem zabeležila v beležko in jo nato glede na prejšnjo meritev preračunala v spremembo volumna v mm/dan. Za določitev koeficienta posode K_p (enačba (2)) moramo poznati tudi relativno vlažnost in hitrost vetra.

Relativna vlaga (RH)

Relativna vlaga je razmerje med dejanskim parnim tlakom in zasičenim parnim tlakom pri isti temperaturi T oziroma je razmerje med dejansko količino vode v zraku in količino vode, ki jo lahko le ta prenese (Allen in sod., 1998).

Izbrana raziskovalna ploskev na Hajdrihovi ulici ne vsebuje instrumenta za merjenje vlažnosti, zato sem podatek o relativni vlagi prevzela iz najbližje meteorološke postaje Ljubljana-Bežigrad (slika 16) ob stavbi Agencije Republike Slovenije za okolje. ARSO meteorološke spremenljivke prikazuje na njihovi spletni strani <http://www.vreme.si/met/sl/archive/>.



Slika 16: Meteorološka postaja Ljubljana-Bežigrad (Nadbath, 2008)

Zaradi načina postavitve meteorološke postaje Ljubljana-Bežigrad na dnu kotline in v središču mesta, lahko pridobljene podatke uporabimo za območje celotnega mesta in bližnjo okolico kot navaja Nadbath (2008).

Povprečna hitrost vetra (u_2)

Anemometer je eden od sestavnih delov evaporacijske postaje. Vsebuje podatkovni pomnilnik, ki beleži uro dogodka, dogodek pa predstavlja polovico dogodka zabeleženega na števcu anemometra. Za izračun povprečne hitrosti vetra je potrebno preračunati hitrost vetra na višino 2 m od tal, saj je anemometer postavljen na višini 0,41 m.

Kot navajajo Allen in sodelavci (1988) je hitrost vetra izmerjena na različnih višinah od tal različna. Hitrost vetra je zaradi trenja tal bližje površju nižja, nato pa se z višino logaritemsko povečuje. Hitrost vetra lahko za poljubno višino od tal izračunamo po naslednji enačbi:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln 67,8 \cdot z - 5,42}, \quad (25)$$

v kateri je:

- u_2 hitrost vetra na višini 2 m od tal [m/s],
- u_z izmerjena hitrost vetra na višini z od tal [m/s],
- z višina na kateri je merjena hitrost vetra [m].

4.2.2 Empirični enačbi FAO Penman–Monteith in Thornthwait

Za potrebe izračuna referenčne evapotranspiracije po metodah Thornthwait in Penman-Monteith potrebujemo meritve večih atmosferskih spremenljivk. Ker razen hitrosti vetra ostalih spremenljivk na raziskovalni ploskvi nismo merili, smo vse ostale vhodne podatke pridobili na spletnih straneh ARSO oziroma so bili nadalje preračunani.

5 REZULTATI

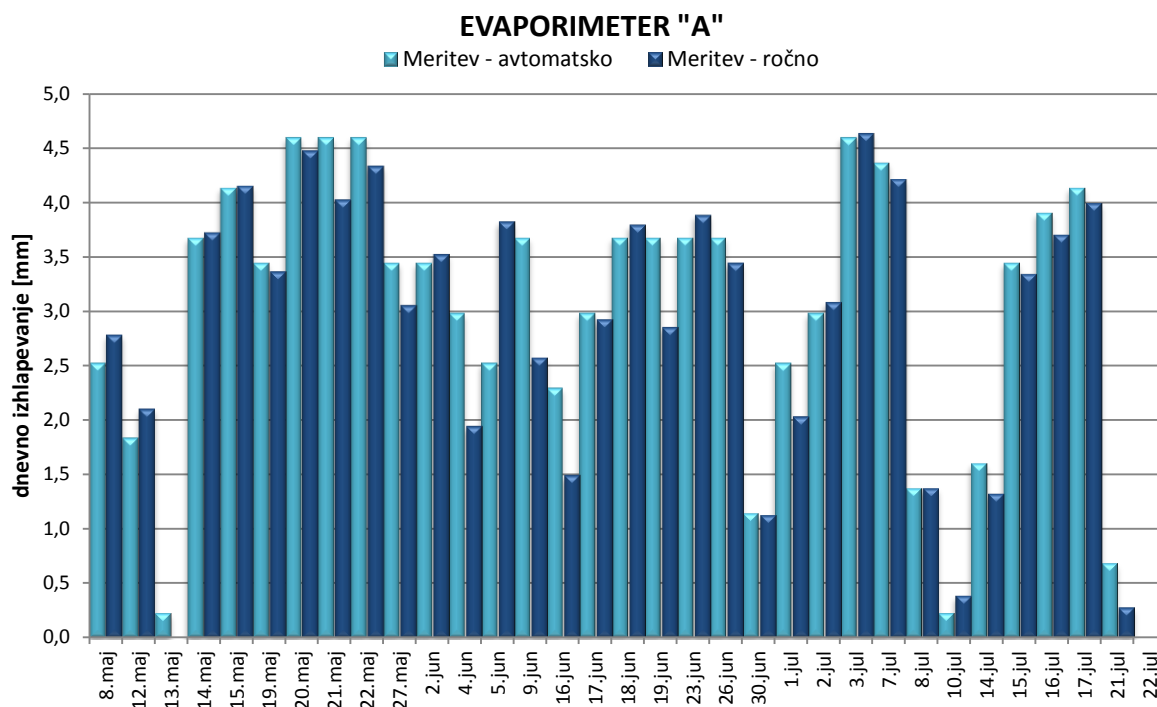
Meritve izhlapevanja s pomočjo evaporacijske posode zaradi načina merjenja niso možne skozi vse leto, saj lahko v hladnejših mesecih voda v posodi zmrzne, merjenje izhlapevanja pa zato ni možno. Na podlagi tega dejstva in obsega bolonjske diplomske naloge, smo se odločili za tri-mesečno opravljanje meritev. Odločili smo se, da bomo začeli s prvim mesecem v letu, v katerem možnosti za zmrzovanje ni več in tako vzeli obdobje od maja do julija 2014.

5.1 Evaporimeter »A«

Avtomatske meritve o gladini vode v evaporacijski posodi, količini zapadlega dežja ter hitrosti vetra na izbrani raziskovalni ploskvi smo iz podatkovnih pomnilnikov na računalnik prenesli približno trikrat na mesec ter podatke pretvorili v .txt datoteko. Kasneje sem podatke ustrezno pretvorila in s pomočjo enačbe (2) izračunala referenčno evapotranspiracijo.

Za približno kontrolo sem poleg meritev, ki so potekale avtomatsko, vsak delavnik zjutraj opravila tudi ročni odčitek gladine vode s pomočjo kljukastega merila. Rezultate obeh metod sem nato za dneve, ki jih je bilo mogoče primerjati, prikazala na grafikonu 2. Seštevek vseh dnevnih rezultatov izhlapevanja, pridobljenih s kljukastim merilom, je enak 92,0 mm. Avtomatsko beleženje nižanja gladine pa nam poda 5 % višji rezultat, ki je 96,8 mm. Gledano v celoti lahko predpostavimo, da je bilo delovanje avtomatskega merilnika vodne gladine pravilno.

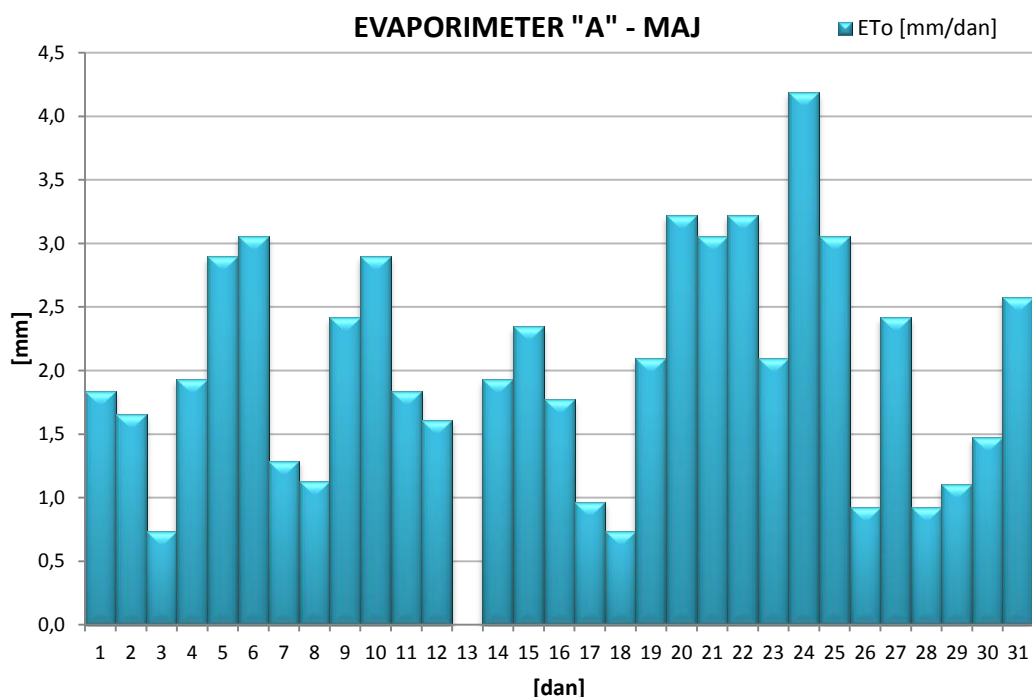
V izbranem časovnem obdobju maj – julij 2014 nam je voda v posodi dvakrat izhlapela do te mere, da je s kljukastim merilom ni bilo več možno pomeriti, zato smo jo zaradi optimalnejših rezultatov dotočili. Dogodek bi lahko imel minimalen vpliv na izhlapevanje zaradi manjše količine vode v posodi, ki se zato hitreje segreje in posledično hitreje izhlapi, vendar smo ocenili, da se gladina vode v posodi ni kritično zmanjšala, zato dogodkov nismo posebej obravnavali. 30. junija ponoči pa je voda zaradi zelo intenzivnih padavin prestopila zgornji rob posode in prelila. Zjutraj smo gladino vode spustili do optimalne višine. Tudi za ta dogodek smo presodili, da na izhlapevanje ni imel pomembnih vplivov na podlagi dveh dejstev: izhlapevanje je ponočni minimalno, skoraj nično, praktično nično pa je bilo prav tako zaradi močne intenzitete padavin.



Grafikon 2: Primerjava ročnih in avtomatskih meritev gladin v evaporacijski posodi v obdobju maju - julij 2014

5.1.1 Rezultati za maj 2014

Na grafikonu 3 so prikazani rezultati izmerjene in po enačbi (2) korigirane vrednosti izhlapevanja v mesecu maju 2014. Opaziti je dva ekstrema in sicer evapotranspiracija je bila največja 24. maja in je znašala 4,2 mm/dan, 13. maja pa je bila najmanjša in je znašala 0,0 mm/dan. Povprečna vrednost za ta mesec je znašala $2,0 \pm 0,9$ mm/dan.



Grafikon 3: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu maju pridobljene z evaporimetrom »A«

Razlogi za največjo dnevno evapotranspiracijo na dan 24. 5. 2014, ki je znašala 4,2 mm/dan, so bili naslednji:

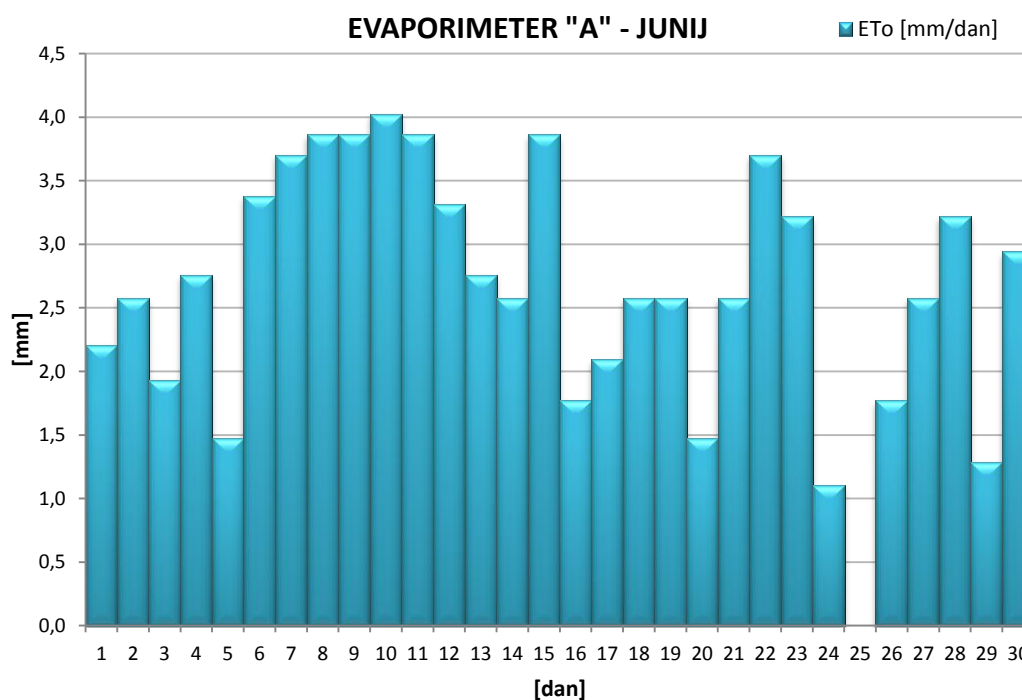
- zelo visoka povprečna dnevna temperatura, ki je znašala 20,7°C,
- največje globalno sončno sevanje, ki je znašalo 29,3 MJ/m²/dan,
- relativno nizka povprečna relativna, ki je znašala 57 %,
- in relativno visoka povprečna hitrost vetra, ki je znašala 0,36 m/s.

Razlogi za najmanjšo dnevno evapotranspiracijo na dan 13. 5. 2014, ki je znašala 0,0 mm/dan so bili naslednji:

- najmanjša povprečna dnevna temperatura, ki je znašala 8,5°C,
- najmanjše globalno sončno sevanje, ki je znašalo 6,5 MJ/m²/dan,
- najvišja izmerjena povprečna relativna vlaga, ki je znašala 95 %,
- in najnižja povprečna hitrost vetra, ki je znašala 0,05 m/s.

5.1.2 Rezultati za junij 2014

Grafikon 4 prikazuje dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juniju 2014. V primerjavi z majem so v povprečju dnevne vrednosti evapotranspiracije višje za 25 %. Razlog za to je dejstvo, da so bile dnevne povprečne vrednosti temperature višje kar za 4,4 °C, povprečne dnevne vrednosti globalnega sončnega sevanja pa so bile večje za 2,8 MJ/m²/dan. Povprečna vrednost relativne vlage je bila v juniju malenkost večja kot v maju, povprečna hitrost vetra pa je bila nekoliko nižja kot v maju. Zadnja dva dejavnika bi sicer lahko pripomogla k nekoliko nižji evapotranspiraciji, vendar pa zaradi prevlade drugih dveh dejavnikov (temperatura in globalno sončno sevanje) temu ni bilo tako. Relativna vlaga bistveno pripomore k zmanjšanju izhlapevanja le, ko gre za resnično visoke vrednosti vlage v zraku (90 – 100 %), ko atmosfera praktično ni zmožna sprejemati dodatnih količin vodne pare.



Grafikon 4: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juniju pridobljene z evaporimetrom »A«

Povprečna vrednost izhlapevanja za ta mesec je znašala $2,6 \pm 1,0$ mm/dan. Največja vrednost evapotranspiracije je bila zabeležena 10. 6. 2014 in sicer 4,0 mm/dan, nična pa 25. 6. 2014.

Razlogi za največjo dnevno evapotranspiracijo, ki je znašala 4,0 mm/dan so bili zelo ugodni dejavniki, ki povečujejo izhlapevanje:

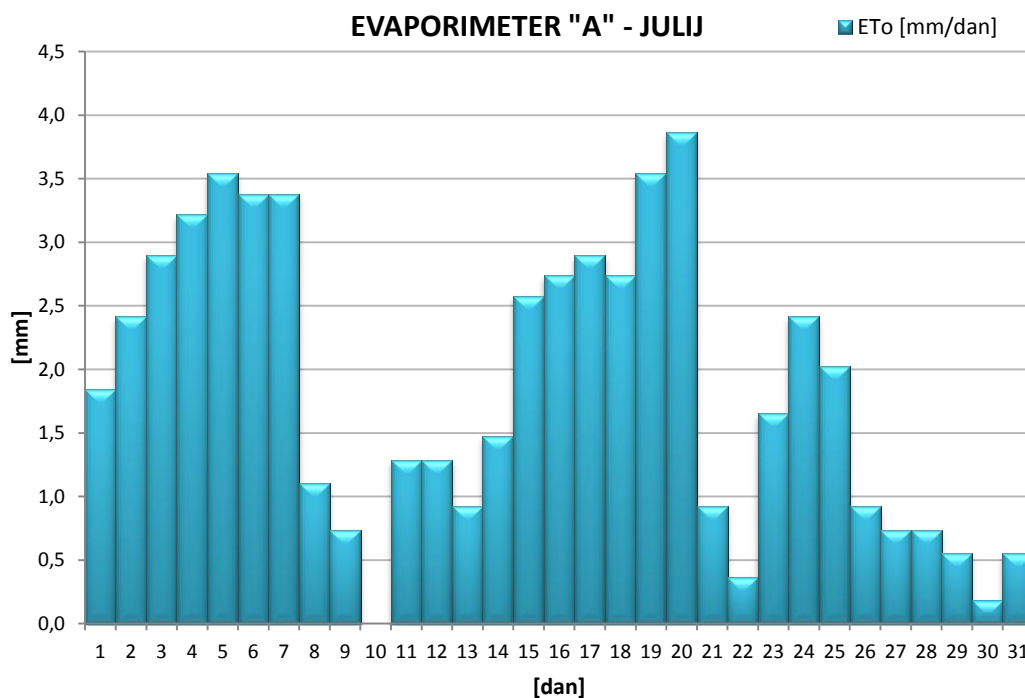
- zelo visoka dnevna povprečna temperatura, ki je znašala $26,1^{\circ}\text{C}$,
- največje globalno sončno sevanje, ki je znašalo $30,2 \text{ MJ/m}^2/\text{dan}$,
- relativno nizka povprečna relativna vlaga, ki je znašala 56 %,
- povprečna hitrost vetra pa je bila pod povprečno vrednostjo in zato ni bistveno pripomogla k povečanju, znašala je 0,18 m/s.

Razlogi za nično dnevno evapotranspiracijo na dan 25. 6. 2014, so bili naslednji:

- zelo nizka dnevna povprečna temperatura, ki je znašala $16,3^{\circ}\text{C}$,
- najmanjše globalno sončno sevanje, ki je znašalo $6,7 \text{ MJ/m}^2/\text{dan}$,
- najvišja izmerjena povprečna relativna vlaga, ki je znašala 93 %,
- in najnižja povprečna hitrost vetra, ki je znašala 0,05 m/s.

5.1.3 Rezultati za julij 2014

Grafikon 5 prikazuje dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juliju 2014. Rezultati kažejo, da je bila povprečna dnevna evapotranspiracija za kar 30 % manjša kot v mesecu juniju in celo nekoliko manjša kot v prvem opazovanem mesecu. Oblačnost v tem mesecu je bila zelo velika, posledica pa je, da je globalno sončno sevanje imelo zelo majhen vpliv na evapotranspiracijo. Sočasno je bila relativna vlaga ob dneh z nizkim sončnim sevanjem zelo visoka, kar je še dodatno pripomoglo k nižji evaparaciji.



Grafikon 5: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juliju pridobljene z evaporimetrom »A«

Povprečna vrednost izhlapevanja za ta mesec je znašala $1,8 \pm 1,2$ mm/dan. Največja vrednost evapotranspiracije je znašala 3,9 mm/dan in je bila zabeležena 20. 7. 2014, nična evapotranspiracija pa je bila 10. 7. 2014.

Razlogi za največjo dnevno evapotranspiracijo, ki je znašala 3,9 mm/dan so bili naslednji:

- najvišja dnevna povprečna temperatura, ki je znašala $26,0^{\circ}\text{C}$,
- relativno veliko globalno sončno sevanje, ki je znašalo $26,4 \text{ MJ/m}^2/\text{dan}$,
- najnižja povprečna relativna vlaga, ki je znašala 59 %,
- najvišja povprečna hitrost vetra, ki je znašala je 0,38 m/s.

Razlogi za najmanjšo dnevno evapotranspiracijo, ki je znašala 0,0 mm/dan pa so bili naslednji:

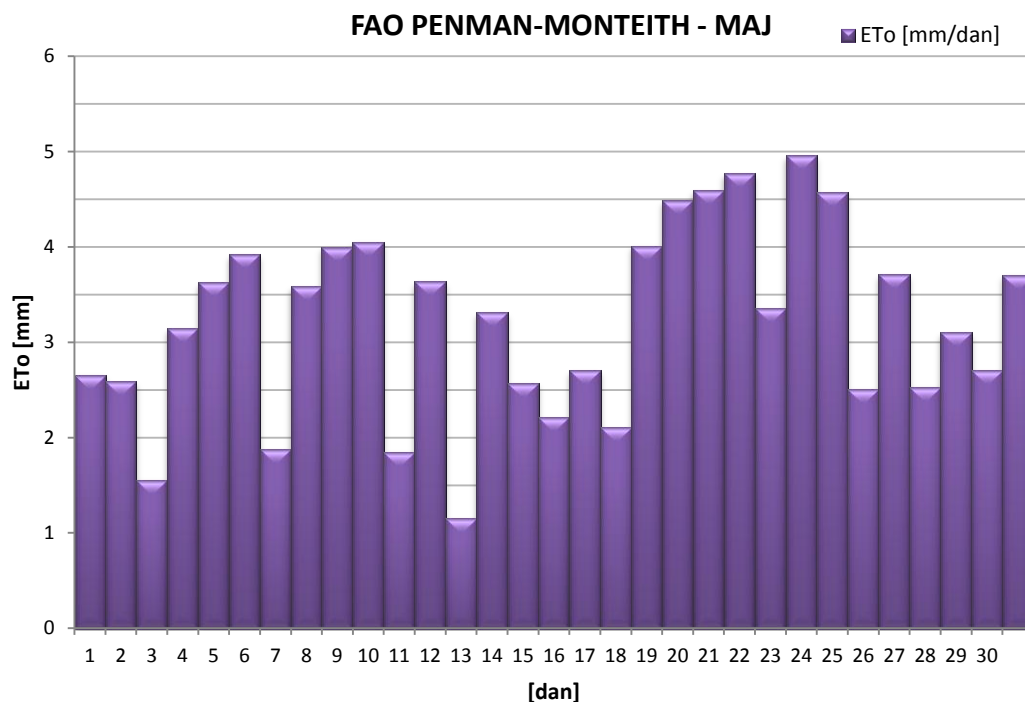
- najnižja dnevna povprečna temperatura, ki je znašala $13,9^{\circ}\text{C}$,
- zelo nizko globalno sončno sevanje, ki je znašalo $6,3 \text{ MJ/m}^2/\text{dan}$,
- najvišja izmerjena povprečna relativna vlaga, ki je znašala 93 %,
- in zelo nizka povprečna hitrost vetra, ki je znašala 0,07 m/s.

5.2 FAO Penman-Monteithova enačba

Evapotranspiracijo sem za izbrano raziskovalno ploskev na Hajdrihovi ulici izračunala tudi s pomočjo kombinirane FAO Penman-Monteithove enačbe. To je enačba, ki zahteva precej izmerjenih atmosferskih spremenljivk (enačba (3)).

5.2.1 Rezultati za maj 2014

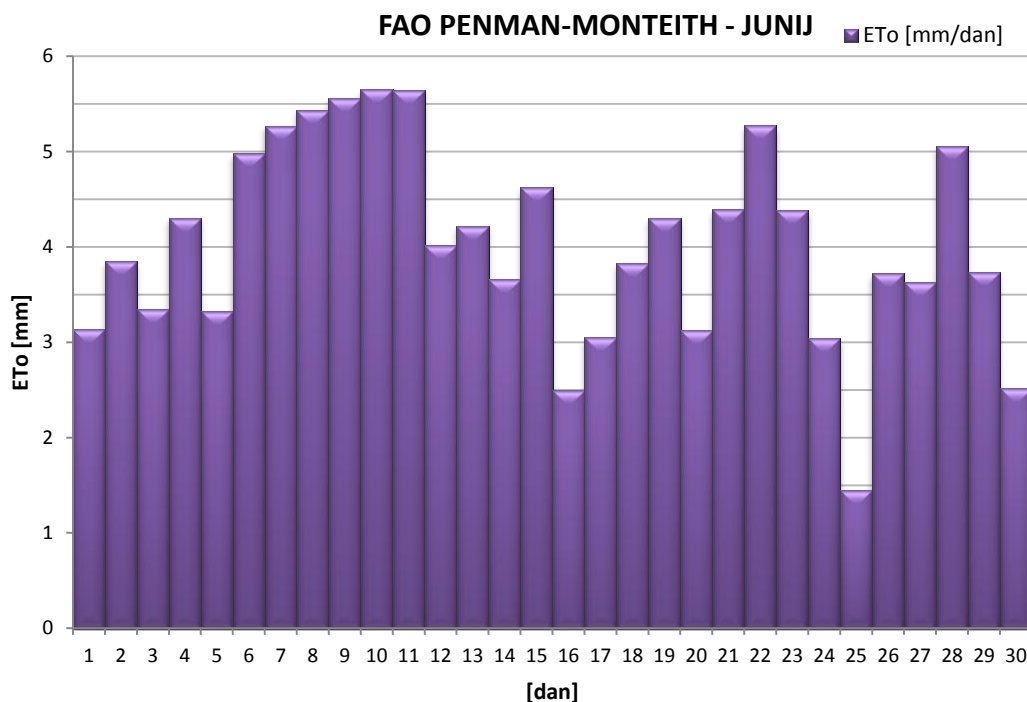
Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu maju, izračunane s Penman-Monteithovo enačbo, izkazujejo nekoliko višje vrednosti od izmerjenih s pomočjo evaporimetra »A«. Na grafikonu 6 lahko vidimo, da je bila evapotranspiracija največja 24. 5. 2014 in je znašala 5,0 mm/dan, najmanjša pa je bila 13. 5. 2014, ko je znašala 1,2 mm/dan.



Grafikon 6: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu maju izračunane s FAO Penman-Monteithovo enačbo

5.2.2 Rezultati za junij 2014

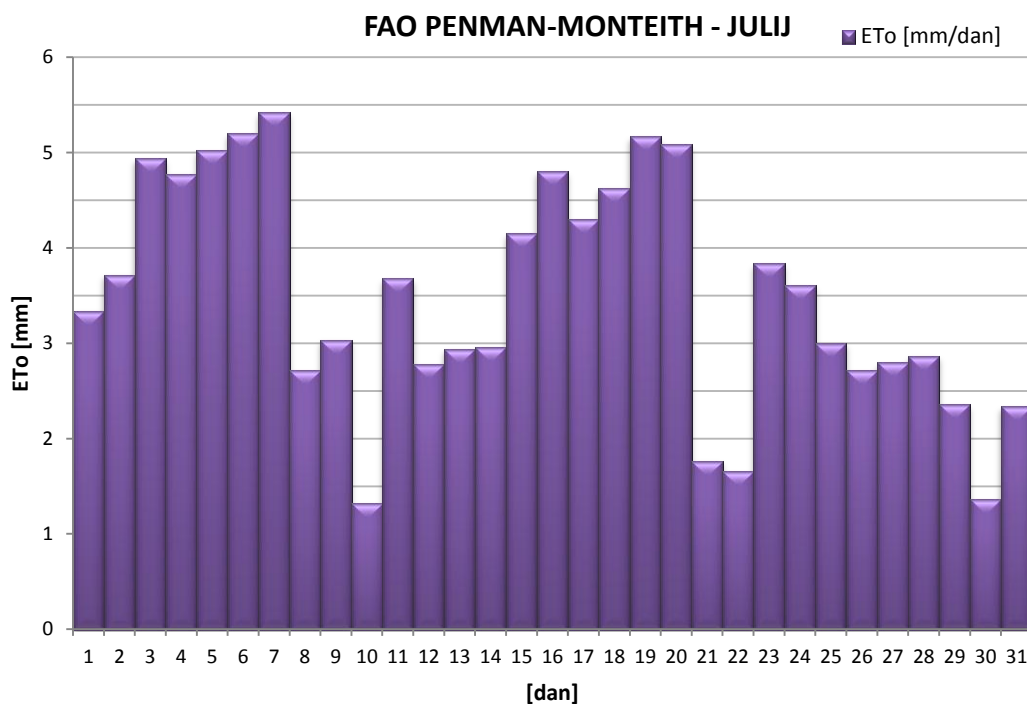
Grafikon 7 prikazuje izračunane dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juniju, na katerem lahko vidimo, da je bila evapotranspiracija največja 10. 6. 2014 in je znašala 5,7 mm/dan, najmanjšo vrednost pa je dosegla 25. 6. 2014, ko je znašala 1,4 mm/dan. Od 6. do 11. junija je zaznati trend višanja evapotranspiracije, iz katerega lahko sklepamo, da je bilo vreme takrat lepo in stabilno z visokimi temperaturami, nizko relativno vlažnostjo ter visokim globalnim sončnim sevanjem.



Grafikon 7: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juniju izračunane s FAO Penman-Monteithovo enačbo

5.2.3 Rezultati za julij 2014

Najvišja dnevna vrednost izračunane evapotranspiracije v mesecu juliju se je zgodila 7. 7. 2014 in je znašala 5,4 mm/dan, najmanjša vrednost pa 10. 7. 2014, ko je evapotranspiracija znašala 1,3 mm/dan (grafikon 8).

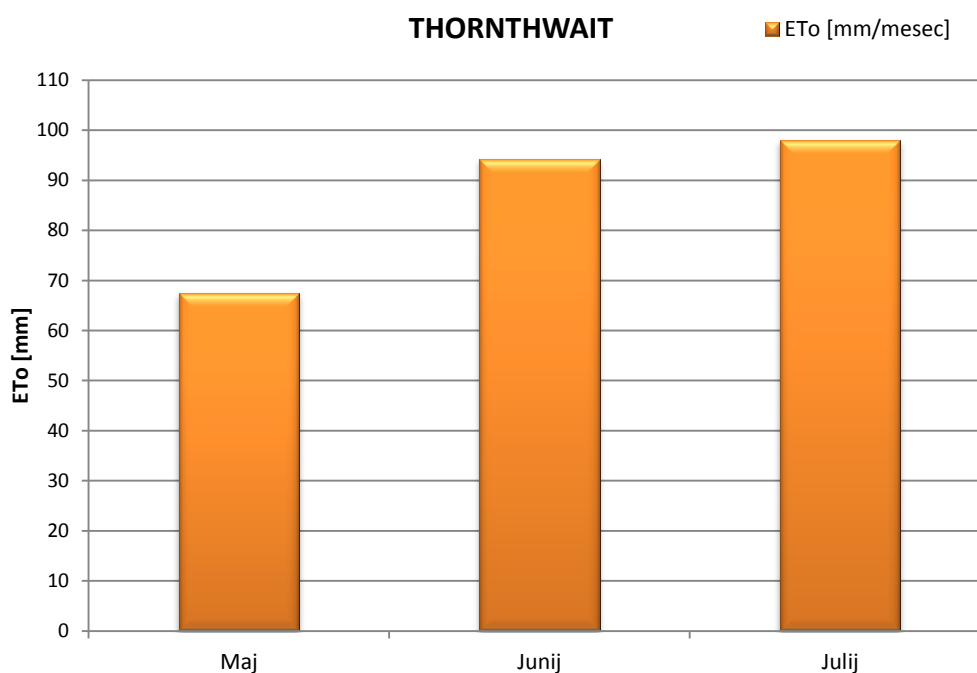


Grafikon 8: Dnevne vrednosti evapotranspiracije v mesecu juliju izračunane s FAO Penman-Monteithovo enačbo

5.3 Thornthwaitova enačba

Thornthwaitova enačba je zelo preprosta enačba za izračun izhlapevanja, ki zahteva le izmerjene vrednosti temperature (enačba (22)). Podatek o povprečni mesečni temperaturi zraka moramo imeti izmerjen, ostali dve spremenljivki pa nato preračunamo. Je ena izmed najenostavnejših metod, z njo pa lahko izračunamo le povprečne mesečne vrednosti evapotranspiracije (grafikon 9). Podatek o povprečnih mesečnih temperaturah sem za postajo Ljubljana-Bežigrad prevzela iz spletnih strani ARSO (ARSO, 2014a).

Vrednost evapotranspiracije je po Thornthwaitovi enačbi premo sorazmerna s povprečno mesečno temperaturo. Ker je ta iz meseca v mesec postopno naraščala, lahko na grafikonu 9 vidimo, da je iz meseca v mesec postopno naraščala tudi evapotranspiracija. V mesecu maju je znašala 67,5 mm, v juniju 94,3 mm in v juliju 98,0 mm.



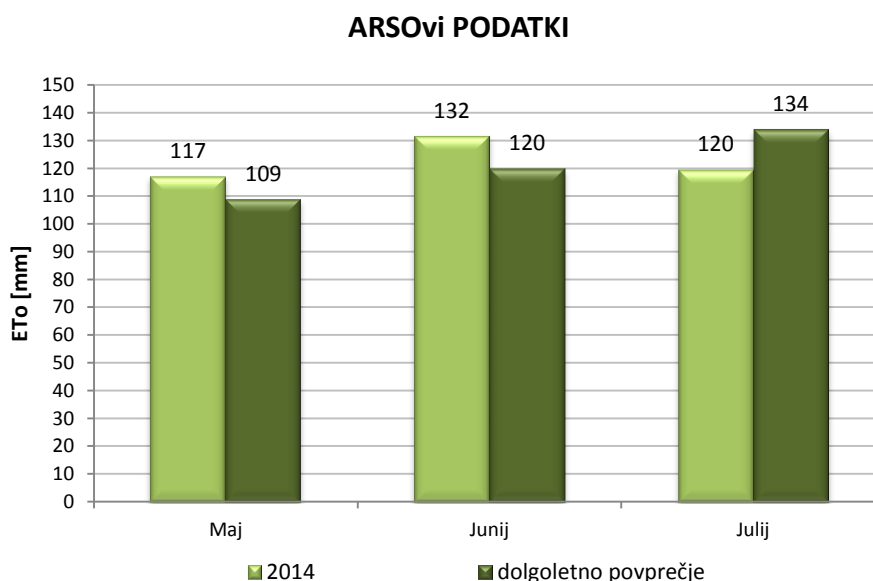
Grafikon 9: Mesečne vrednosti evapotranspiracije izračunane s pomočjo Thornthwaitove enačbe

6 PRIMERJAVA REZULTATOV IN ANALIZA

6.1 Primerjava vrednosti referenčne evapotranspiracije pridobljenih z evaporimetrom »A«, s FAO Penman-Monteithovo enačbo in Thornthwaitovo enačbo ter ARSO-vo najbližjo meteorološko postajo

Evaporimeter »A« in FAO Penman-Monteithova enačba nam omogočata pridobitev dnevni vrednosti evapotranspiracije. Ker pa nam Thornthwaitova temperaturna metoda omogoča le izračun mesečnih vrednosti evapotranspiracije, smo najprej primerjali dnevne vrednosti prvih dveh metod in nato še mesečne vrednosti vseh treh izbranih metod.

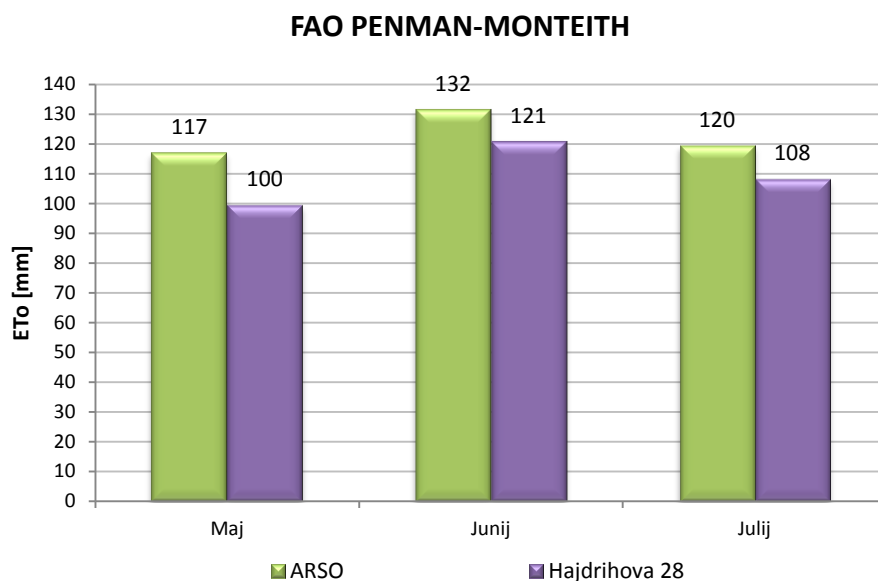
Za primerjavo evapotranspiracije na Hajdrihovi ulici smo izbrali najbližjo ARSO-vo meteorološko postajo Ljubljana-Bežigrad, kjer evapotranspiracijo računajo po standardizirani FAO Penman-Monteithovi enačbi. Kot je razvidno iz grafikona 10, se po ARSO-vih podatkih vrednosti v letu 2014 za do 10 % razlikujejo od dolgoletnega povprečja (1971-2000). Spodnje vrednosti kažejo, da je bila evapotranspiracija v mesecu maju z vrednostjo 117 mm za 7 % nad dolgoletnim povprečjem, ki znaša 109 mm. Tudi v juniju je bila evapotranspiracija z vrednostjo 132 mm nekoliko višja (10 %) od dolgoletnega povprečja, ki znaša 120 mm. Za julij 2014 pa bi lahko rekli, da smo imeli nekoliko slabše pogoje za evapotranspiracijo, saj je bila le ta za 14 mm (10 %) manjša od dolgoletnega povprečja.



Grafikon 10: Primerjava ARSO-vih podatkov o referenčni evapotranspiraciji za leto 2014 z dolgoletnim povprečjem (1971-2000)

6.1.1 Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije izračunane po FAO Penman-Monteithovi metodi

Referenčna evapotranspiracija izračunana po FAO Penman-Monteithovi enačbi za lokacijo na Hajdrihovi ulici prikazuje nekoliko nižje vrednosti od izračunanih vrednosti za ARSO-vo meteorološko postajo Ljubljana-Bežigrad (grafikon 11). V mesecu maju je bila evapotranspiracija manjša za 17 mm (15 %), v juniju za 11 mm (8 %) in v juliju za 12 mm (10 %).

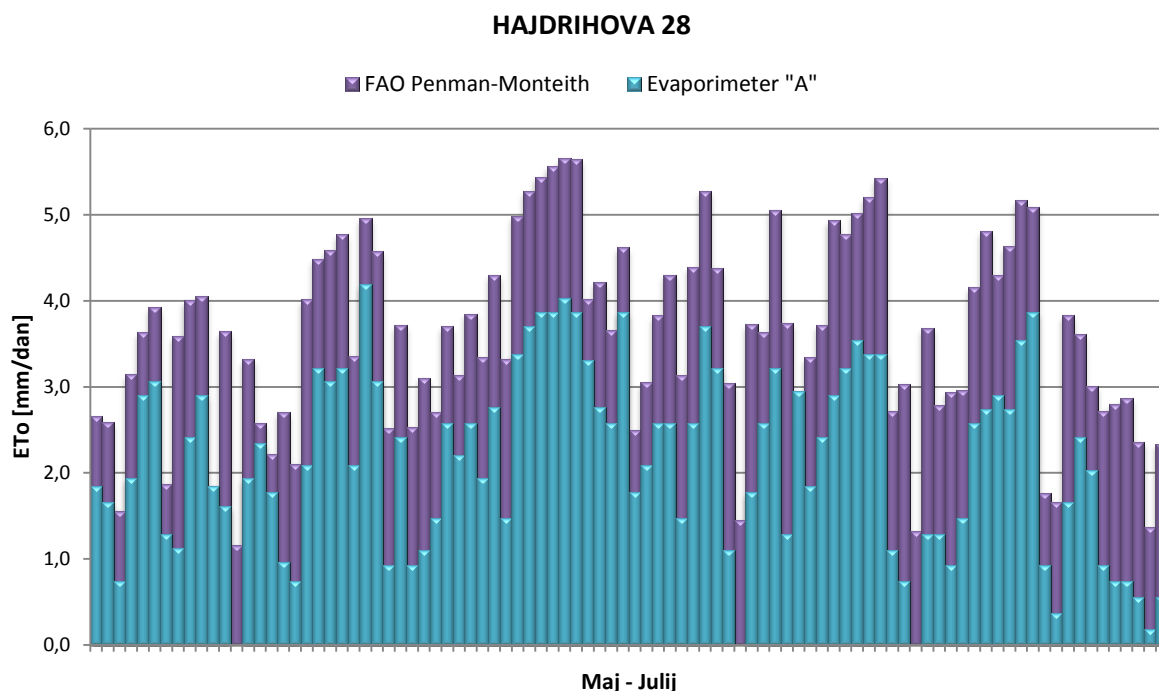


Grafikon 11: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije med izbranimi lokacijama, pridobljenih s FAO Penman-Monteithovo enačbo

Glavni razlog za nižje vrednosti je edina različna spremenljivka, hitrost vetra, ki smo jo na izbrani raziskovalni ploskvi v izbranih opazovanih mesecih merili sami. Vrednosti te spremenljivke so v primerjavi z ARSO-vimi vrednostmi občutno nižje, kar pripomore tudi k nižjim rezultatom. Glavni razlog različnih vrednosti hitrosti vetra je najverjetneje v višinski razliki postavitve anemometrov na obeh postajah. Anemometer na naši raziskovalni ploskvi je postavljen tik nad gladino vode v evaporacijski posodi, na postaji Ljubljana-Bežigrad pa na strehi na višini 22 m (Cesar, 2011). Poleg tega anemometer na Hajdrihovi ni optimalno postavljen, saj so visoki objekti precej blizu. Kot lahko vidimo na sliki 14 je s severne strani anemometra zelo blizu stavba in na južni strani živa meja (slika 15), kar pomeni, da za severni in južni veter ne dobimo pravih rezultatov na anemometru.

6.1.2 Primerjava različnih metod določitve referenčne evapotranspiracije za raziskovalno ploskev na Hajdrihovi ulici

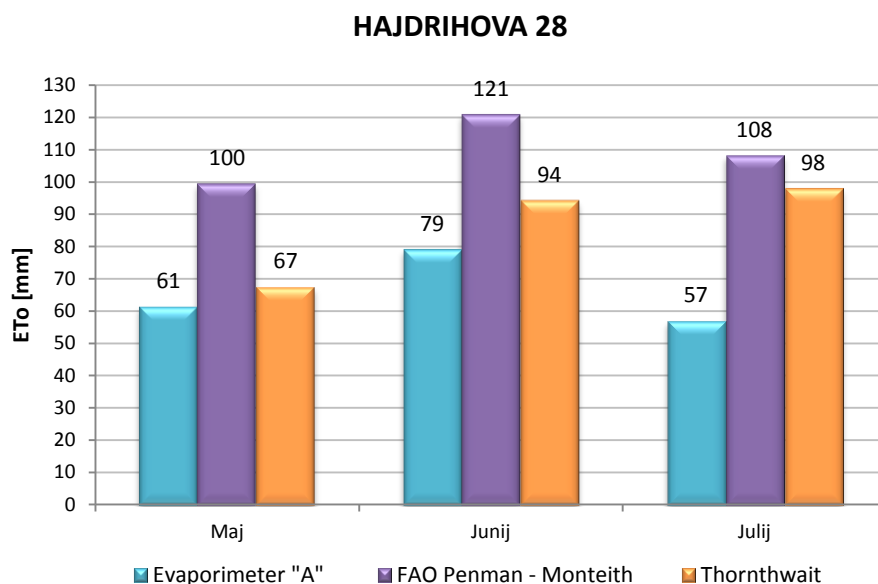
Za določitev referenčne evapotranspiracije smo izbrali tri različne metode, in sicer meritve z evaporacijsko posodo A ter izračun po dveh empiričnih enačbah: FAO Penman-Monteithovi in Thornthwaitovi. Iz grafikona 12 lahko vidimo, da so meritve z evaporimetrom »A« primerljive z empirično enačbo, a v povprečju nižje za 40 %.



Grafikon 12: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije evaporimetra »A« in FAO Penman-Monteitha

Da so rezultati pridobljeni z evaporimetrom »A« nekoliko nižji od tistih pridobljenih s FAO Penman-Monteithovo enačbo potrjujejo tudi Racz in sodelavci (2013). V pet-letnem obdobju opravljanja meritev za namen primerjave različnih metod izračuna referenčne evapotranspiracije so ugotovili, da se vrednosti med metodama vsakoletno razlikujejo za 10 do 30 %. Skleпам, da smo za lokacijo na Hajdrihovi podatke o referenčni evapotranspiraciji dobili še nekoliko nižje zaradi ne optimalne postavitve evaporimetra »A« kar lahko opazimo tudi na sliki 15. Posoda je postavljena zelo blizu višje vegetacije, katera bi morala biti odmaknjena vsaj 10 m.

Kot lahko vidimo iz grafikona 13 nam najmanjše vrednosti izkazuje evaporimeter »A«, sledi Thornthwaitova metoda in njej FAO Penman-Monteithova enačba.



Grafikon 13: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije pridobljene z različnimi metodami za raziskovalno ploskev na Hajdrihovi ulici

Rezultati Thornthwaitove metode so sicer bližje FAO Penman-Monteithovi metodi, vendar pa se zaradi zanašanja zgolj na povprečno mesečno temperaturo kaže odstopanje v tretjem opazovanem mesecu, ko bi referenčna evapotranspiracija morala biti nižja od vrednosti v juniju, kar pravilno nakazujeta obe ostali metodi. Za to metodo bi lahko rekli, da je zadovoljiva zgolj za primere, ko potrebujemo zelo grobo oceno referenčne evapotranspiracije za določen kraj. Menim, da je njeno največje pomanjkanje neupoštevanje podatka o globalnem sončnem sevanju.

Primerjava prvih dveh metod je v primerjavi z dolgoletnim povprečje, prikazanem na grafikonu 1, pokazala največje odstopanje v mesecu juliju. Kot v mesečnem biltenu navaja Cegnar (2014) je bil glede na pretekla leta julij v letu 2014 podpovprečno toplel, oziroma ni imel veliko izrazito toplih dni, tudi padavin je bilo več kot običajno. Oblačnost je bila nadpovprečna, kot posledica pa je bilo globalno sončno sevanje, ki najbolj vpliva na evapotranspiracijo, manjše.

6.2 Vpliv posameznih dejavnikov na evapotranspiracijo

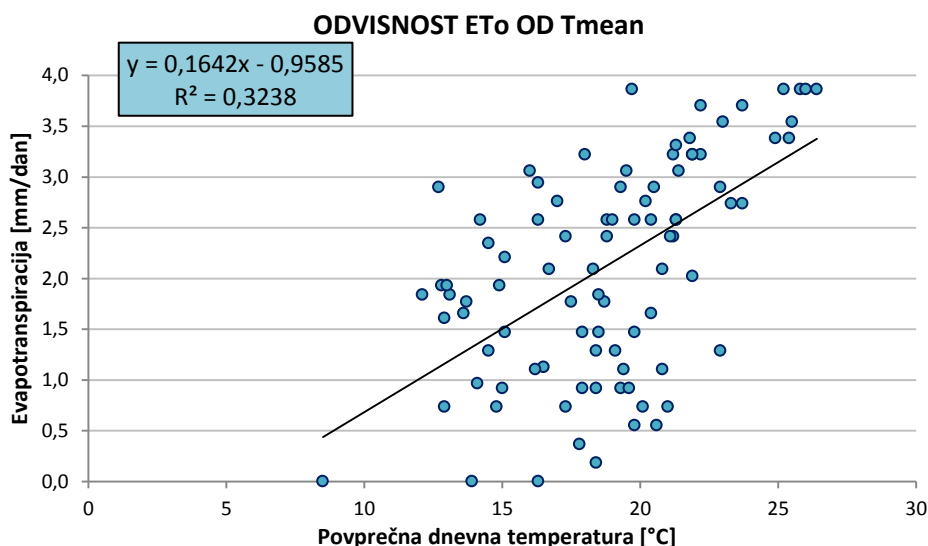
Dejavniki, ki najbolj vplivajo na količino izhlapevanja so: temperatura zraka, sončno sevanje, relativna vlaga in hitrost vetra. Za prikaz odvisnosti med posameznimi dejavniki in izhlapevanjem smo izbrali podatke o evapotranspiraciji pridobljene z evaporimetrom »A«.

Odvisnost referenčne evapotranspiracije od posameznih spremenljivk smo prikazali z regresijskimi premicami. Na grafih, ki prikazujejo odvisnost, je prikazana tudi regresijska enačba in koeficient R^2 .

Pri iskanju odvisnosti evapotranspiracije od posameznih spremenljivk smo zajeli podatke vseh treh opazovanih mesecev, pri grafičnem vzporejanju spremenljivk pa smo zaradi boljše preglednosti predstavili le podatke za prvi opazovani mesec (maj).

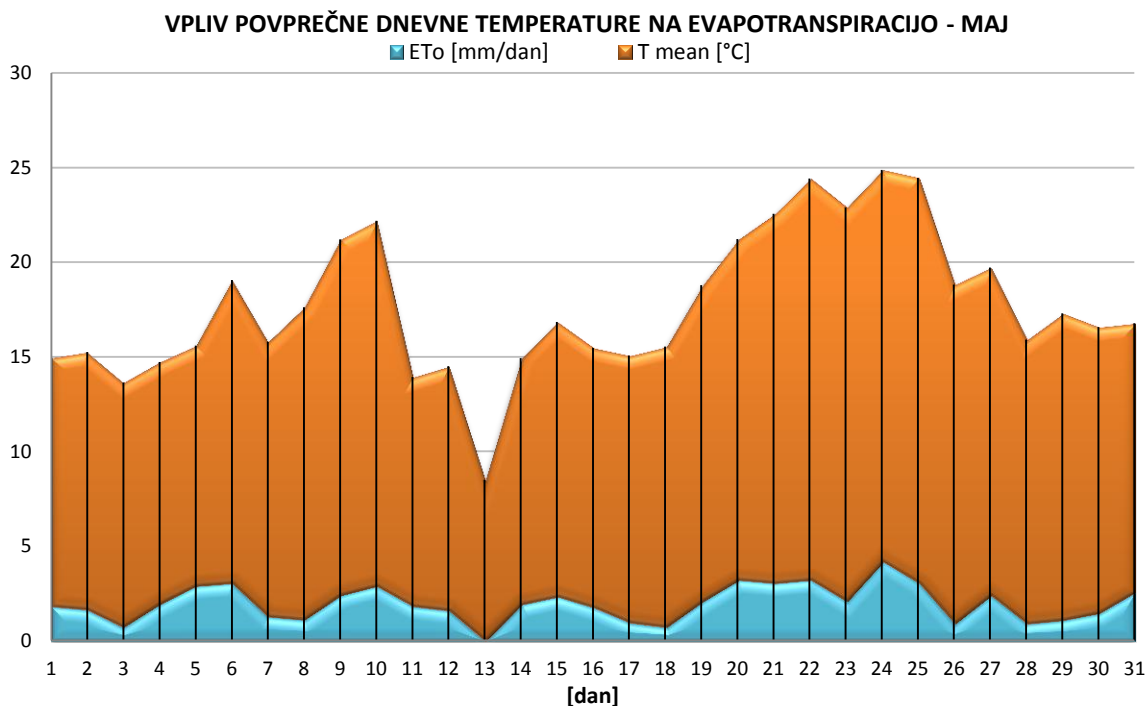
6.2.1 Odvisnost evapotranspiracije od povprečne dnevne temperature zraka

Odvisnost evapotranspiracije od povprečne dnevne temperature zraka nam prikaže pozitivno korelacijo, kar pomeni, da sta spremenljivki premo sorazmerni (grafikon 14). Koeficient korelacije, ki znaša 0,57 in regresijska enačba nam povesta, da sta spremenljivki srednje močno odvisni. Višja temperatura zraka načeloma pomeni večjo evapotranspiracijo, seveda ob spremljavi še drugih pomembnih dejavnikov, ki vplivajo na večjo evapotranspiracijo.



Grafikon 14: Odvisnost evapotranspiracije od povprečne dnevne temperature

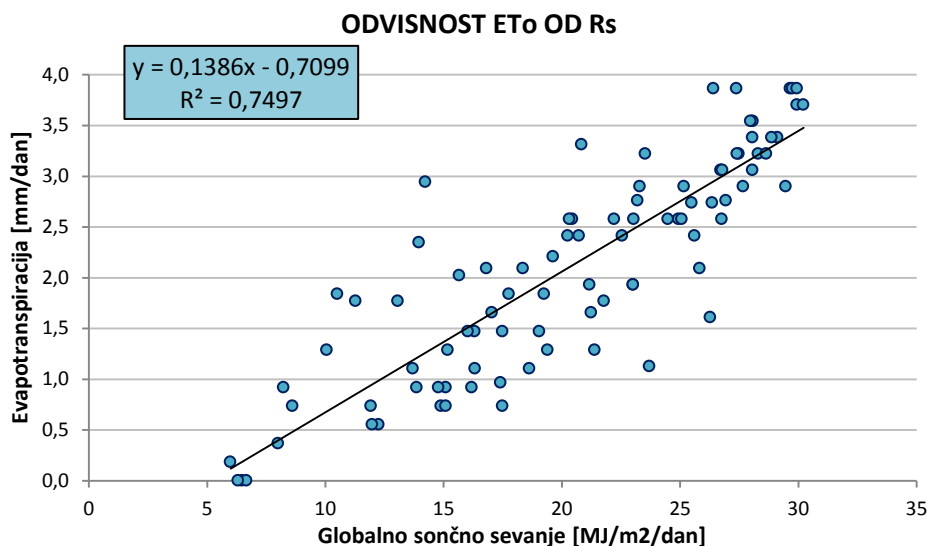
Grafikon 15 prikazuje vzporedno spreminjanje povprečne dnevne temperature in referenčne evapotranspiracije v mesecu maju 2014. Iz grafikona je lepo razvidna prejšnja ugotovitev, da se ob višanju temperature, evapotranspiracija povečuje in obratno.



Grafikon 15: Vpliv povprečne dnevne temperature na evapotranspiracijo za mesec maj 2014

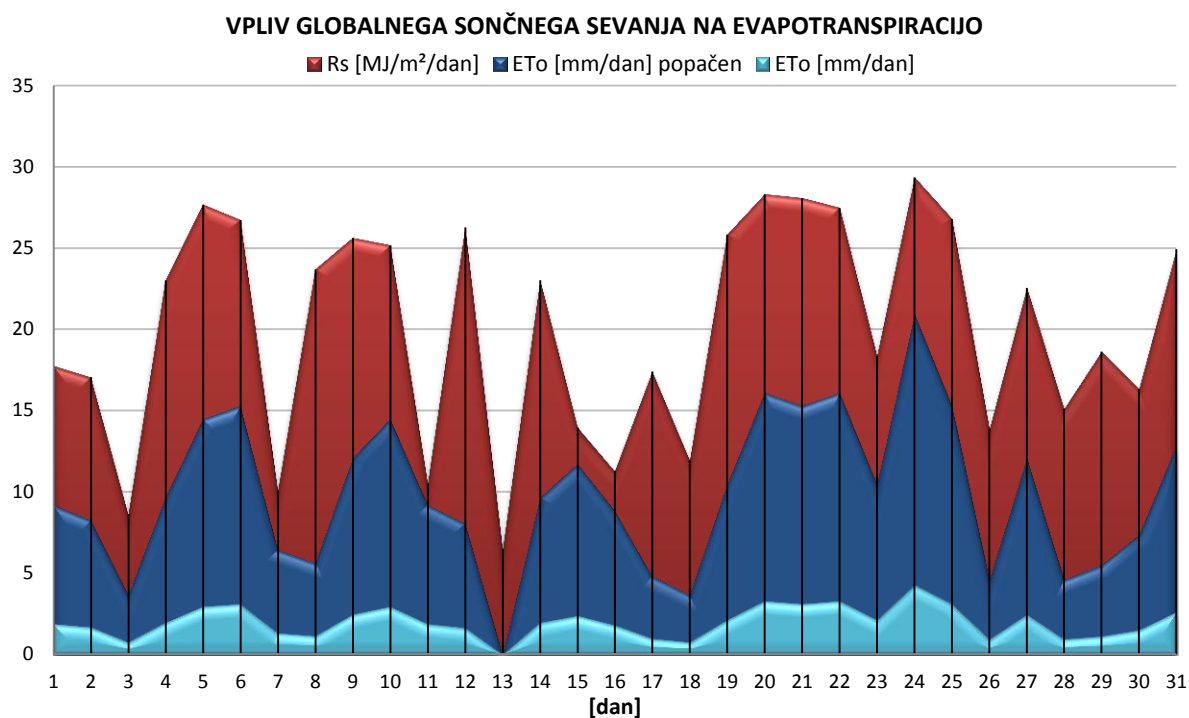
6.2.2 Odvisnost evapotranspiracije od globalnega sončnega sevanja

Grafikon 16 prikazuje pozitivno korelacijo in zelo močno odvisnost med evapotranspiracijo ter globalnim sončnim sevanjem. Koeficient korelacije znaša 0,87, kar pomeni, da sta spremenljivki zelo močno premo sorazmerno odvisni. Sklenemo lahko, da večje, kot je globalno sončno sevanje, večja je evapotranspiracija.



Grafikon 16: Odvisnost evapotranspiracije od globalnega sončnega sevanja

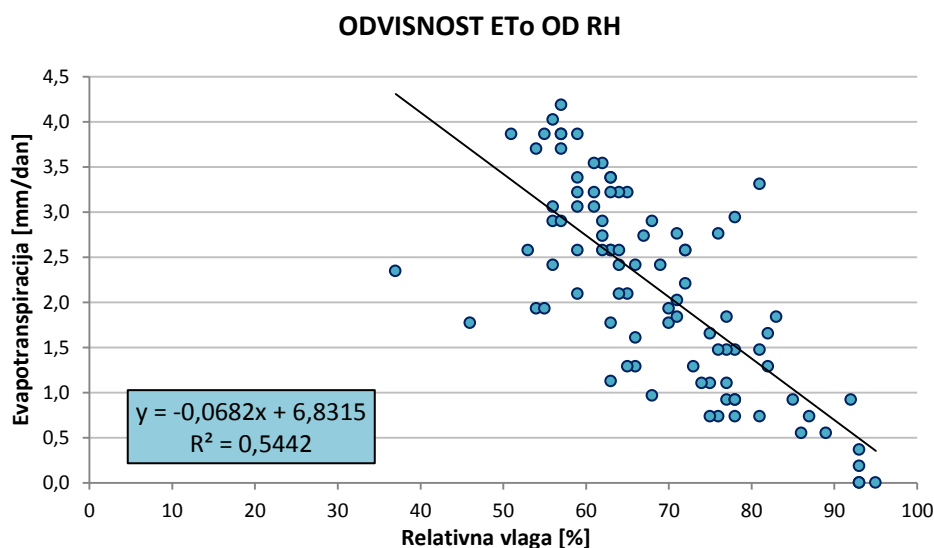
Ugotovimo lahko, da ima na raziskovalni ploskvi na Hajdrihovi največji vpliv na evapotranspiracijo prav globalno sončno sevanje. Ta vpliv je prikazan tudi na grafikonu 17, na katerem lahko dobro vidimo premo sorazmernost naraščanja oziroma padanja ene spremenljivke z drugo. Za boljšo preglednost smo referenčno evapotranspiracijo pomnožili s faktorjem 5 (popačili). Tudi Cesar (2011) je za meteorološko postajo Ljubljana-Bežigrad ugotovila največjo odvisnost prav od sončnega sevanja, podobno pa je ugotovila tudi za postaje Portorož, Murska Sobota in Kredarica.



Grafikon 17: Vpliv globalnega sončnega sevanja na evapotranspiracijo za mesec maj 2014

6.2.3 Odvisnost evapotranspiracije od relativne vlage

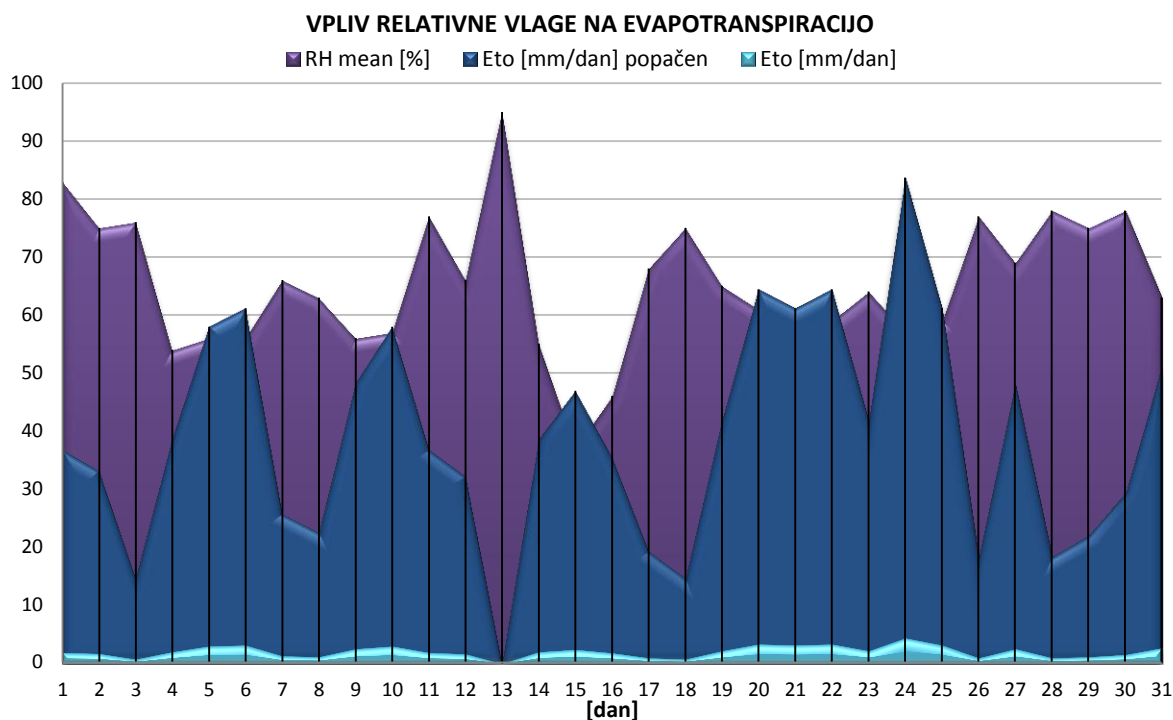
Odvisnost evapotranspiracije od relativne vlage je obratno sorazmerna (grafikon 18). Koefficient korelacije je negativen in znaša $-0,74$, kar pomeni precej močno odvisnost. Ta odvisnost nam pove, da manjša kot bo relativna vlaga v zraku, večje bo izhlapevanje, saj lahko suh zrak sprejme večjo količino izhlapele vlage.



Grafikon 18: Odvisnost evapotranspiracije od relativne vlage

Grafikon 19 prikazuje vzporedno spreminjanje relativne vlage in referenčne evapotranspiracije. Za boljšo preglednost je evapotranspiracija (prikazana s temno modro barvo) pomnožena s faktorjem 20 (popačena). Vidimo lahko, da sta spremenljivki obratno

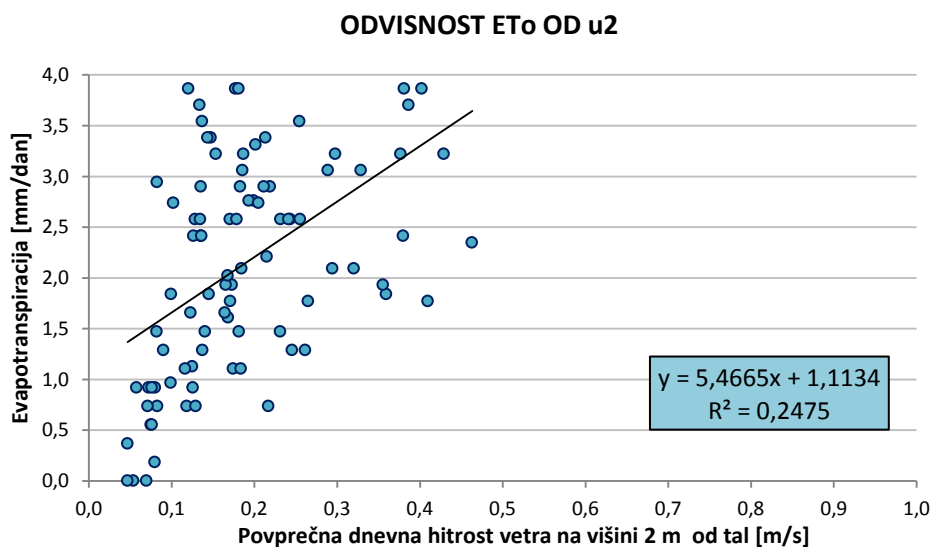
sorazmerni z najboljšim prikazom 13. maja, ko je bilo ozračje zelo nasičeno in skoraj ni sprejemalo dodatne vlage v obliki evapotranspiracije.



Grafikon 19: Vpliv relativne vlage na evapotranspiracijo za mesec maj 2014

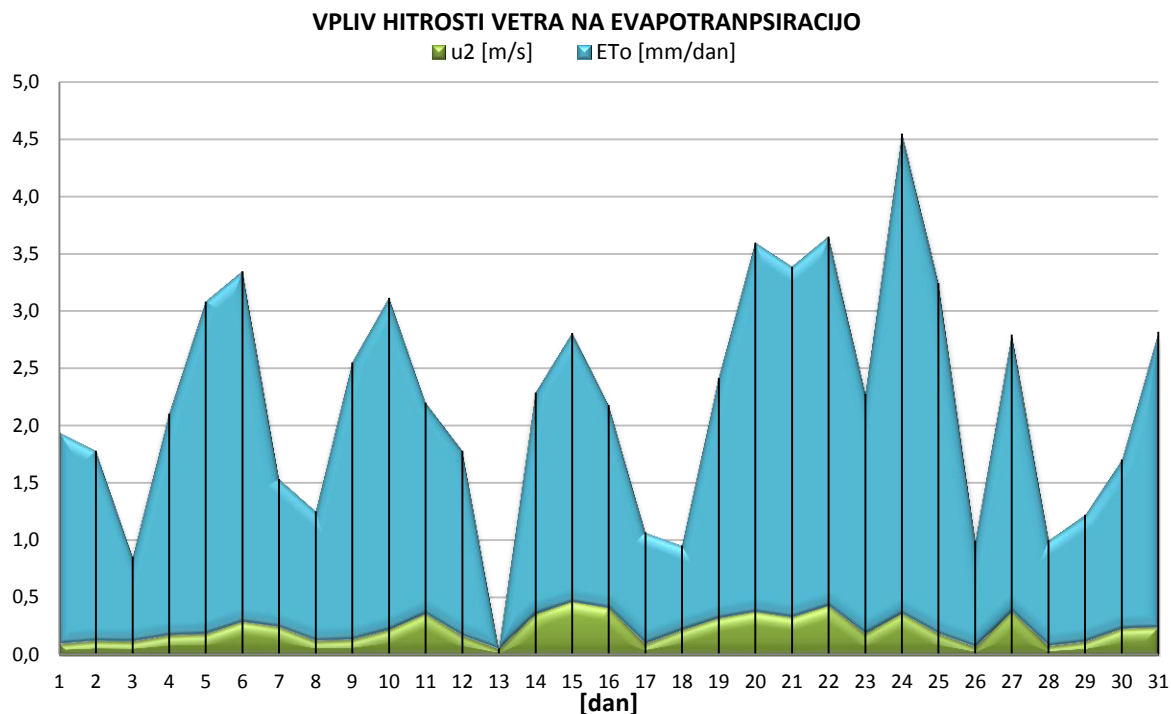
6.2.4 Odvisnost evapotranspiracije od hitrosti vetra

Kot lahko razberemo iz grafikona 20 je odvisnost evapotranspiracije od hitrosti vetra premo sorazmerna. Koeficient korelacije znaša 0,50 in je pozitiven. Odvisnost je majhna, a statistično značilna. Iz tega lahko sklepamo, da ima veter na raziskovalni ploskvi najmanjši vpliv na količino evapotranspiracije. V splošnem pa lahko rečemo, da se s hitrostjo vetra izhlapevanje povečuje.



Grafikon 20: Odvisnost evapotranspiracije od povprečne dnevne hitrosti vetra na višini 2 m od tal

Zadnje dejstvo potrjuje tudi vzporeden prikaz hitrosti vetra in evapotranspiracije za mesec maj 2014. Vidimo, da so skoraj vse večje konice evapotranspiracije povezane s povečanjem hitrosti vetra.



Grafikon 21: Vpliv povprečne dnevne hitrosti vetra na evapotranspiracijo za mesec maj 2014

7 ZAKLJUČKI

Za potrebe diplomske naloge in določitev evapotranspiracije na merski ploskvi na Hajdrihovi 28, smo izbrali tri-mesečno obdobje meritev od maja do julija 2014.

V prvem delu diplomske naloge so opisane izbrane metode merjenja in računanja referenčne evapotranspiracije. Najprej je predstavljena metoda merjenja izhlapevanja s pomočjo evaporimetra »A«. v nadaljevanju pa sta predstavljeni še dve v praksi pogosto uporabljeni metodi izračuna referenčne evapotranspiracije: enostavna temperaturna metoda Thornthwaita in kompleksnejša kombinirana metoda Penman-Monteitha.

V drugem delu diplomske naloge so predstavljeni rezultati meritev in izračuna vseh treh predstavljenih metod. Rezultate posameznih metod smo med seboj primerjali, poleg tega pa smo jih primerjali tudi z izračunanimi vrednostmi na ARSO-vi meteorološki postaji Ljubljana-Bežigrad. Rezultati so pokazali, da so vrednosti, izmerjene z evaporacijsko posodo A za 40 % nižje od tistih, ki jih izračunamo s Penman-Monteithovo enačbo. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi nekateri drugi raziskovalci (Racz in sod., 2013). V pet-letnem obdobju meritev so ugotovili, da se vrednosti med metodama vsakoletno razlikujejo za 10 do 30 %. Na naši lokaciji pa je ta razlika še nekoliko večja zaradi ne popolnoma optimalne postavitve posode, ki mora biti od višje vegetacije in objektov odmaknjena vsaj 10 m. Thornthwaitove vrednosti evapotranspiracije so bile nekje vmes, a bližje izmerjenim vrednostim. Primerjava referenčne evapotranspiracije izračunane po FAO Penman-Monteithovi enačbi za lokacijo na Hajdrihovi ulici in postajo za Bežigradom pa izkazuje nekoliko nižje vrednosti na lokaciji Hajdrihove ulice. Razlog je v različni višini meritve vetra, saj je na Hajdrihovi veter merjen tik nad evaporacijsko posodo, na ARSO-vi postaji Ljubljana-Bežigrad pa na višini 22 m.

Najverjetneje je ocena referenčne evapotranspiracije najboljša po FAO Penman-Monteithovi enačbi. Enačba za izračun evapotranspiracije zahteva meritve mnogih atmosferskih spremenljivk, kar je ob enem negativna stran te enačbe. Do vseh zahtevanih spremenljivk lahko pridemo le z dobro opremljeno meteorološko postajo. V kolikor imamo večjo meteorološko postajo, ki zagotavlja informacije o vseh potrebnih spremenljivkah dokaj blizu, je enačbo priporočljivo uporabiti. V kolikor pa takšne postaje nimamo v bližini, je bolje, da se poslužujemo drugih metod. Druga slaba stran te enačbe je, da zaradi zahtevnosti in dodatnih izračunov posameznih parametrov terja kar precej časa.

Analize vplivnih dejavnikov so pokazale, da ima največji vpliv na referenčno evapotranspiracijo na raziskovalni ploskvi na Hajdrihovi globalno sončno sevanje. Do podobne ugotovitve je prišla tudi Cesar (2011) v svoji diplomski nalogi, kjer je ugotovila, da je sončno sevanje najvplivnejši dejavnik na vseh obravnavanih postajah (Ljubljana, Portorož, Murska Sobota in Kredarica). Med vsemi omenjenimi postajami je za Ljubljano ugotovila največji korelacijski koeficient med evapotranspiracijo in sončnim sevanjem ($R = 0,98$). Globalno sončno sevanje se v poletnih mesecih povečuje in posledično se s toplejšim ter stabilnejšim vremenom povečuje tudi referenčna evapotranspiracija. Naslednji zelo pomemben vplivni dejavnik z visokim koeficientom korelacije je relativna vlaga. Njen vpliv je obratno sorazmeren. Manjši kot je procent relativne vlage v zraku, večja bo referenčna evapotranspiracija, saj lahko atmosfera prejme večje količine vodne pare. Vpliv temperature zraka je imel precej manjši koeficient korelacije, kar nakazuje na to, da na raziskovalni ploskvi temperatura nima tako velikega vpliva kot sončno sevanje ali relativna vlažnost. Najmanjši vpliv na raziskovalni ploskvi je imela hitrost vetra. Kljub izkazanemu manjšemu

neposrednemu vplivu, ima veter še posredni učinek, saj pripomore k večanju oziroma manjšanju relativne vlage v zraku.

Evapotranspiracijo lahko merimo in računamo na več načinov. V nalogi smo pokazali, da so rezultati zelo odvisni od izbrane metode in da se lahko med seboj precej razlikujejo. Izbira metode pa je po navadi pogojena z razpoložljivimi podatki in potrebami.

VIRI

- ARSO. 2014a. Arhiv – opazovani in merjeni meteorološki podatki po Sloveniji.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (Pridobljeno 22. 8. 2014.)
- ARSO. 2014b. Energija sončnega obsevanja.
http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/Energija_soncnega_obsevanja.pdf (Pridobljeno 20. 11. 2014.)
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements, FAO, 300 str.
<http://extension.uidaho.edu/kimberly/files/2013/04/fao56.pdf> (Pridobljeno 15. 7. 2014.)
- Bezak, N. 2014. Delovanje anemometra proizvajalca Rickly Hydrological Co. Message to: Bezak, N., 9. 5. 2014. Osebna komunikacija.
- Bezak, N. 2015. Opis evaporacijske postaje na Hajdrihovi ulici. Message to: Bezak, N., 27. 2. 2015. Osebna komunikacija.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. 1. izdaja. Ljubljana, UL FGG: 309 str.
- Cegnar, T., Meteorologija. Podnebne razmere v juliju 2014. ARSO. 2014. Mesečni bilten ARSO – julij 2014. ARSO: str. 3.
<http://www.arso.gov.si/o%20agenciji/knji%C5%BEnica/mese%C4%8Dni%20bilten/NASE%20OKOLJE%20-%20Julij%202014.pdf> (Pridobljeno 20. 4. 2015)
- Cesar, P. 2011. Primerjava različnih metod izračuna evapotranspiracije. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Cesar): 133 str. <http://drugg.fgg.uni-lj.si/1058/> (Pridobljeno 18. 8. 2014.)
- Davie, T. 2008. Fundamentals of hydrology. Routledge: 220 str.
- Dodds, P.E., Meyer W.S., Barton, A. 2005. A Review of Methods to Estimate Irrigated Reference Crop Evapotranspiration across Australia. CRC for Irrigation Futures: 54 str.
- Hidrosfera. 2015.
<http://sl.wikipedia.org/wiki/Hidrosfera> (Pridobljeno 20. 4. 2015.)
- Hladnik, J., Vodnik, D. Regulacija prevodnosti listnih rež. Acta agriculturae Slovenica. 2007.
<http://aas.bf.uni-lj.si/avgust2007/17hladnik.pdf> (Pridobljeno 26. 11. 2014.)
- Merjenje zračnega pritiska. 2015.
http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/navsin_tp.html (Pridobljeno 17. 4. 2015.)
- Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Muller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002 Hidrološko izrazje. Terminology in hydrology. Acta hydrotehnica 20/32, Ljubljana.
ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (Pridobljeno 27. 3. 2014.)
- Nadbath, M. 2008. Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad. Naše okolje, posebna izdaja.
<http://www.vreme.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/stations/ljubljana-bezigrad.pdf>
(Pridobljeno 6. 4. 2015.)

- Pintar, M. 2006. Osnove namakanja s poudarkom na vrtninah in sadnih vrstah v zahodni, osrednji in južni Sloveniji. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. NUK Ljubljana. http://www.mkgp.gov.si/fileadmin/mkgp.gov.si/pageuploads/publikacije/Namakanje/11_Osnove_namak_s_poud_na_vrtninah_in_sadnih_vrstah_v_Z_O_J_Slov.pdf (Pridobljeno 20. 4. 2015)
- Racz, C., Nagy, J., Dobos, A. C., 2013. Comparison of several methods for calculation of reference evapotranspiration. Acta Silv. Ling. Hung., Vol. 9 (2013) 9-24.
[DOI: 10.2478/aslh-2013-0001](https://doi.org/10.2478/aslh-2013-0001)
- Rickly hydrological company. 1998. Totalizing anemometer with electrical contact. Uporabniška navodila anemometra z električnim kontaktom – model 1002-010 & 1002-011. 7 str.
- Rickly hydrological company. 2009. Evaporacijska postaja – model 3590. <http://www.rickly.com/MI/3590.htm> (Pridobljeno 20. 3. 2014.)
- Russell. 2015. Kljukasto merilo 1275. <http://www.russell-scientific.co.uk/1275-hook-gauge-302-p.asp> (Pridobljeno 23. 2. 2015.)
- Shaw E.M. 1994. Hydrology in Practice. 3rd ed., Taylor & Francis e-Library. 4: 68-71
- SVAROG. 2014. Kraljestvo: rastline (plantae). http://mss.svarog.si/biologija/index.php?page_id=7610 (Pridobljeno 25. 11. 2014.)
- Unidata. 2014. Precision water level instrument Model 6541 C. Instrument za natančno merjenje vodne gladine Model 6541 C. <http://www.unidata.com.au/products/water-monitoring-modules/precision-water-level-instrument/> (Pridobljeno 27. 2. 2015)
- Vaisala. 2015. Dežemer RG13/RG13H. <http://www.vaisala.com/en/products/rainandprecipitationsensors/Pages/RG13RG13H.aspx> (Pridobljeno 27. 2. 2015.)
- Ward, A.D., Trimble, S.W. 2004. Environmental hydrology. 2nd ed., CRC Press LLC. 4: 86-87.
- World Meteorological Organization. 1994. Guide to hydrological practices. 5th edition., WMO-No: 735 str.
- Zoubek. G. 2014. Assembly and placement of evapotranspiration gauge. Montaža in postavitve naprave za merjenje evapotranspiracije. <http://www.youtube.com/watch?v=dWagbK3v6PA> (Pridobljeno 26. 11. 2014.)