

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Porovnání přímých a nepřímých metod měření evapotranspirace na zemědělsky
intenzivně obhospodařovaném území**

Autor: Bc. Daria Shadrina

Vedoucí práce: Ing. Václav Hradilek

2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Václava Hradilka. Použila jsem zdroje, které jsou uvedeny v seznamu literatury. Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes UIS.

V Praze 31.3.2023

.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Václavu Hradilkovi za věnovaný čas, rady, trpělivost a odbornou pomoc při zpracování mé práce.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Daria Shadrina

Environmentální vědy
Aplikovaná ekologie

Název práce

Porovnání přímých a nepřímých metod měření evapotranspirace na zemědělsky intenzivně obhospodařovaném území

Název anglicky

Comparison of experimental and indirect methods of evapotranspiration: A case study on intensive agriculture land

Cíle práce

Cílem práce je získání znalostí o přímých i nepřímých metodách měření evapotranspirace. Tyto znalosti se dají rozdělit na fyzikální podstatu pochopení přímých a nepřímých metod měření. Dále na pochopení vlivu okolního prostředí na přímé metody měření (Eddy covariance, Scintilometer). Na základě těchto poznatků dojde ke srovnání jednotlivých metod měření. Přímými metodami měření jsou měření indexu lomu pomocí scintilometru a monitorováním toků vodních par a CO₂ pomocí systému eddy covariance spolu s měřením dalších meteorologických veličin nutných k výpočtu aktuální evapotranspirace pomocí výše zmíněných přístrojů. Jako nepřímá metoda měření bude použita hydrologická bilance povodí. Výsledkem práce bude srovnání výsledků měření přímých a nepřímých metod měření. U dat ze systému eddy covariance dojde k porovnání vhodnosti využití sady dostupných metodik. K výpočtům bude využit dostupný software.

Metodika

V rámci teoretické části práce bude vypracována rešerše se zaměřením na principy přímého a nepřímého měření evapotranspirace. Práce bude zaměřena konkrétně na metody, využívající pro výpočet aktuální evapotranspirace lom světla a změny koncentrací vodních par a CO₂ v hraniční vrstvě atmosféry. Práce se podrobněji zaměří na porovnání dostupných metodik zpracování dat ze systému eddy covariance.

Praktická část bude obsahovat sběr dat na povodí Brejlského potoka a Karlova luhu spolu s kontrolou a nastavením přístrojů na aktuální podmínky prostředí. Pro nepřímé metody měření budou využita meteorologická data zaznamenaná na meteorologických stanicích na povodí a dále pak data, která poskytuje ČHMÚ. Data budou zpracována a porovnána za vegetační sezónu 2020 a 2021.

Doporučený rozsah práce

40

Klíčová slova

Evapotranspirace, eddy covariance, scintilometr, hydrologická bilance

Doporučené zdroje informací

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration —guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*. 1926, 27(6), 779–787. ISSN 0031899X. doi:10.1103/PhysRev.27.779
- DUFFKOVÁ, R. *Evapotranspirace a transpirace rozdílně využívaných travních porostů*. Praha: ČZU-FAPPZ, 2006.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1948, 193(1032), 120–145. ISSN 0080-4630.
- SAVAGE, M. J., C. S. EVERSON a B. R. METELERKAMP. Bowen ratio evaporation measurement in a remote montane grassland: Data integrity and fluxes. *Journal of Hydrology*. 2009, 376(1–2), 249–260. ISSN 00221694. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.038

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Václav Hradílek

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Konzultant

Petr Máca

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2022

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2023

Abstrakt

Získávání co nejpřesnějších mikrometeorologických dat je velmi důležité pro správné pochopení a modelování hydrologických procesů, zejména v souvislosti s klimatickými změnami a řízením vodních zdrojů. Přesné a spolehlivé měření evapotranspirace je klíčové pro správné plánování a řízení zavlažování, zemědělské produkce, prevence sucha, ochrany přírody a dalších aspektů. Proto je důležité, aby se vědci a vodohospodářští pracovníci snažili neustále zdokonalovat metody měření a zpracování dat, aby byly výsledky co nejpřesnější a spolehlivé. Výpočet aktuální evapotranspirace může být značně komplikován, a proto je důležité vybrat co nejvhodnější nepřímou metodu odhadu evapotranspirace pro jednotlivé lokality. V řadě případů je třeba řešit u experimentu problematický terén a nejednoznačné podmínky atmosféry. Problémy mohou být i u samotné aparatury a je riziko neočekávaných zásahů (zvěř, technika atd.). Správný design experimentu pro sledování hodnot evapotranspirace v hospodářsky využívané lokalitě je podstatnou součástí výzkumu. Důležité je brát v úvahu velké množství faktorů: změna výšky porostu, zavlažování, střídání plodin, přítomnost zvěře. Cílem práce je srovnání jednotlivých metod měření, zjištění a analýza problémů v průběhu experimentu a návrh umístění systému EC v lesní a zemědělské části. Experiment byl uskutečněn na povodí Brejlského potoka, kde měření probíhalo prostřednictvím systému Eddy Covariance a povodí Karlova luhu, kde byl nainstalován scintilometr. Odhad evapotranspirace nepřímou metodou pro každé povodí byl stejný, vzhledem k velké podobnosti dostupných dat pro jednotlivé povodí. Mezery v datech u Eddy Covariance značně komplikovaly interpretace výsledků, ale poukázaly na skutečnost, že v současném umístění jsou určité nedostatky a zařízení by mělo být nainstalováno v jiné lokalitě.

Klíčová slova: evapotranspirace, eddy covariance, scintilometr, hydrologická bilance

Abstract

Obtaining the most accurate micrometeorological data is very important for the correct understanding and modeling of hydrological processes, especially in connection with climate change and water resource management. Accurate and reliable measurement of evapotranspiration is crucial for proper planning and management of irrigation, agricultural production, drought prevention, nature conservation and other aspects. Therefore, it is important that scientists and water managers strive to constantly improve measurement methods and data processing to make the results as accurate and reliable as possible. The calculation of the current estimate of evapotranspiration can be quite complicated, and therefore it is important to choose proper indirect method of estimating evapotranspiration for individual locations. In many cases, the experiment is complicated by problematic terrain and uncertain atmospheric conditions, problems with equipment and unexpected interventions (animals, agrotechnical equipment, etc.). The correct design of an experiment on agricultural lands is an essential part of the research. It is important to consider certain factors: changes in canopy height,

irrigation plan, crop rotation, the presence of wildlife. The aim of this work is to compare individual methods of evapotranspiration measurements, detection of current experimental problems and further analysis of these problems, suggestions for experimental design for Eddy Covariance system in the forest and agricultural land. The current measurements were performed at the basin of the Brejlský brook and the basin of Karlův mead brook. Eddy Covariance system was installed in the basin of Brejlsky brook. Measurements via Scintillometer were performed at the area of Karlův mead basin. Indirect estimation of evapotranspiration for both river basins have the same value due to the big similarity of the available data for each river basin. Gaps in the Eddy Covariance datasets complicated the interpretation of the results, this implies that there are certain problems in current location and the equipment should be installed on the other measurement site.

Key words: Evapotranspiration, Eddy Covariance, Scintillometer, Hydrologic Balance

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce	1
3. Literární rešerše	1
3.1. Evaporace.....	1
3.2. Rozdělení a druhy výparů	2
3.2. Transpirace.....	2
3.2.1. Fyziologie rostlin	3
3.2.2. Klima a transpirace	3
3.3. Evapotranspirace.....	4
3.3.1. Faktory ovlivňující evapotranspiraci.....	4
3.3.2. Potenciální a aktuální evapotranspirace.....	5
3.3.3. Aktuální evapotranspirace.....	5
3.3.4. Potenciální evapotranspirace.....	6
3.3.5. Referenční evapotranspirace	7
3.3.6. Evapotranspirace za normálních podmínek (ET_c).....	10
3.3.7. Evapotranspirace v nestandardních podmínkách ($ET_{c\text{ adj}}$).....	10
3.3.8. Vegetační období a evapotranspirace.....	10
3.4. Metody měření evapotranspirace	11
3.4.1. Nepřímé metody.....	11
3.4.2. Přímé metody	12
4.1. Metodika	16
4.1.1. LI-COR 7200RS	16
4.1.2. LAS Mk II.....	17
5. Praktická část	18
5.1. Popis lokality	18
5.1.2. Land use a land cover.....	19
5.1.3. Geologie a půda	19
5.1.4. Klimatické podmínky.....	20
5.1.5. Hydrologické poměry lokality	20
5.2 Data.....	21
5.2.1 Významnost umístění přístroje	21
5.2.2 Nedostatky v současném umístění	22
5.2.2 Návrh umístění.....	25
5.3. Analýza dat	29

5.4. Výsledky	31
5.4.1 Nepřímý odhad potenciální ET	31
5.4.2 Přímé metody	44
5.4.3 Gap Filling	52
5.4.4 Energy balance residual (EBR) correction.....	52
5.4.5 Porovnání přímých a nepřímých metod	54
Diskuse.....	62
Závěr	64
Literatura.....	65
Přílohy.....	72

1. Úvod

Evapotranspirace je důležitou součástí koloběhu vody. V celosvětovém měřítku se přibližně 64 % srážek vrací do atmosféry prostřednictvím evapotranspirace.[1] Mnoho ekosystémových parametrů, jako půdní vlhkost, produktivita vegetace, obsah živin, jsou podstatně ovlivněny evapotranspirací.

Aktuálně jedním z největších problémů je zvyšující se teplota vzduchu, jež má za následek zvyšování územního výparu a výparu z vodních ploch. Ztráty vody z hydrologického systému nejsou dostatečně nahrazeny srážkovými úhrny, které jsou na území ČR nerovnoměrně rozloženy, a v důsledku toho se u nás vyskytují oblasti, v nichž celkový výpar převyšuje srážky a dochází k projevům sucha. [2]

Kvůli změnám land use a land cover klima na území celé ČR mění charakter prostředí od lesního ke stepnímu. Dopady změny klimatu na hydrologické poměry jsou převážně negativní. Následkem oteplení stoupají nároky na potřebu vody pro transpiraci. [3]

2. Cíle práce

Cílem práce je získání znalosti o přímých i nepřímých metodách měření evapotranspirace. Tyto znalosti se dají rozdělit na fyzikální podstatu pochopení přímých a nepřímých metod měření. Dále na pochopení vlivu okolního prostředí na přímé metody měření (Eddy Covariance, Scintillometer). Na základě těchto poznatků budou srovnány jednotlivé metody měření. Přímými metodami měření jsou měření indexu lomu pomocí scintillometru, monitorování toků vodních par a CO₂ pomocí systému eddy covariance spolu s měřením dalších meteorologických veličin nutných k výpočtu aktuální evapotranspirace pomocí výše zmíněných přístrojů. Součástí práce bude také vytvoření metodiky přístupu k datům, údržba a změny nastavení přístroje ve vztahu k vegetačním změnám v průběhu roku. Nepřímou metodou měření bude hydrologická bilance povodí, Penman-Monteith, Thornthwaite a Hargreaves metody. Cílovým záměrem práce bude srovnání výsledků přímých metod měření, které jsou od sebe vzdáleny přibližně 1 km vzdušnou čarou, a rovněž srovnání těchto hodnot s nepřímým měřením. K výpočtům bude využit dostupný software.

3. Literární rešerše

3. 1. Evaporace

Evaporace je proces, kdy se látka v kapalném stavu mění na plynný stav v důsledku zvýšení teploty nebo tlaku. Evaporace je základní součástí hydrologického cyklu. Proces závisí na teplotě, tlaku a množství vody v půdě. [4] Voda se může vypařovat z mnoha různých druhů povrchu, jako jsou vodní plochy, sníh a led, holá půda, vegetace nebo může dojít k vypařování z antropogenních povrchů (chodníky, silnice, střechy apod.). Evaporace je primární způsob, jakým se voda ve formě vodní páry navrácí zpět do vodního cyklu. Při vypařování dochází k ochlazení okolního prostředí. Opačným

procesem k evaporaci je kondenzace, ke které v přírodních podmínkách nejčastěji dochází v momentě, kdy je vlhký vzduch ochlazen za konstantního tlaku pod teplotu rosného bodu. [5]

3.2. Rozdělení a druhy výparů

- výpar z volné hladiny,
- výpar ze sněhu a ledu,
- výpar z půdy,
- výpar z povrchu vegetace,
- výpar z urbanizovaných území,
- výpar z ostatních pevných nepropustných ploch.

3.3.1. Výpar z volné hladiny

V porovnání s vypařováním z ostatních povrchů jeho intenzita není limitována nedostatkem vody a vypařování z volné hladiny může být označeno jako potenciální. To znamená, že intenzita vypařování závisí na atmosférických podmínkách. [6] Pro měření výparu z volné vodní hladiny se používají výparoměry. [7]

Sledování výparu z volné hladiny je jedním z důležitých způsobů sledování vodní bilance. Na příkladu jezera Most je pozorovaná tendence ke převládání výparu nad srážkovým úhrnem. [2] Podle mapy z *Atlasu podnebí Česka* [8] je v lokalitě jezera Most dlouhodobý průměrný roční úhrn srážek mezi 450 až 550 mm a dlouhodobý průměrný roční výpar z vodní hladiny 600 až 650 mm, což způsobuje stálý průměrný roční pokles hladiny o 12,5 cm. Podle mapy dlouhodobé roční vláhové bilance je roční deficit přibližně 200 mm. V případě suchých ročních období jsou srážky podstatně nižší, výpar z vodní hladiny vyšší a vodní bilance je deficitní. [2]

3.2. Transpirace

Transpirace je proces, při kterém dochází k uvolňování vodní páry do atmosféry během fotosyntetické aktivity v rostlinách. Voda je rostlinami odebíraná z půdy a uvolněna do atmosféry prostřednictvím průduchů. [9]

Transpirace rostlin je procesem, který spojuje vodní a tepelný oběh v malém hydrologickém cyklu a který spolurozhoduje o výměně vody mezi malým a velkým cyklem. Rostliny přepouštějí vodu z listů do atmosféry ve formě vodní páry jen v situaci, kdy jim hrozí vlivem tepla z okolního prostředí přehřátí, které přesáhne optimální teplotu, při níž dosahuje fotosyntéza maximální produkce, kdy rostlina nejvíce roste. Primárním zdrojem ohřevu je teplo ze slunečního záření a primárním zdrojem chladící vody jsou srážky akumulované v půdě. Půda slouží jako vyrovnávací nádrž mezi epizodickým přítokem srážkové vody a vcelku pravidelným odběrem vody na transpiraci. Rostliny tak působí jako jediný aktivní regulátor v celém vodním a tepelném oběhu. [3]

3.2.1. Fyziologie rostlin

Rozdíly v anatomii listů, charakteristikách průduchů, aerodynamických vlastnostech a albedu způsobují odlišné hodnoty transpirace u jednotlivých porostů. [10]

Mezi environmentální faktory, které ovlivňují odpor průduchů, patří intenzita slunečního záření, stav vody v listech, teplota listů a koncentrace oxidu uhličitého. [5] Hodnoty výparu u porostů závisí na způsobu obhospodařování a výživě [11], na termínu výsevu [12] a na druhu či odrůdě plodiny. [13]

Zjištění intenzity transpirace hospodářských rostlin a plevelných druhů je důležité pro posouzení konkurenčních vztahů o vodu mezi jednotlivé druhy rostlin. [14] Ve studii [14] byly sledovány hodnoty EP u jednotlivých druhů. Hodnoty ET byly měřeny kanálovým průtokoměrem. Záznam hodnot během prováděných měření byl prováděn v rozmezí 10 minut. Měření bylo uskutečněno na bázi rostliny nebo lodyhy. [14]

rostlinný druh	termín měření	Q	Q _{max}	Sd.Q _{max}	R _g	S
Kukuřice setá (<i>Zea mays</i>)	2.8. - 8.8. 2005	0,193	0,309	–	14,801	20,6
Laskavec ohnutý (<i>Amaranthus retroflexus</i>)	2.8. - 27.8. 2006	0,018	0,08	–	14,104	99
Locika kompasová (<i>Lactuca serriola</i>)	2.8. - 27.8. 2006 19.7. - 17.8. 2007	0,068 0,025	0,153 0,093	0,102 0,041	14,104 17,777	99 79
Pelyněk černobýl (<i>Artemisia vulgaris</i>)	2.8. - 27.8. 2006 19.7. - 17.8. 2007	0,077 0,084	0,150 0,157	0,062 0,092	14,104 17,777	99 79
Pcháč rolní (<i>Cirsium arvense</i>)	2.8. - 8.8. 2005	0,016	0,025	–	14,801	20,6
Řepka ozimá (<i>Brassica napus</i>)	9.6. - 22.7. 2005 5.6. 25.7. 2006 26.4. - 29.6. 2007	0,044 0,092 0,030	0,121 0,187 0,079	0,033 0,074 0,055	17,077 22,342 19,548	174,8 65,1 195,9
Turanka kanadská (<i>Conyza canadensis</i>)	2.8. - 27.8. 2006 19.7. - 17.8. 2007	0,046 0,078	0,116 0,174	0,043 0,051	14,104 17,777	99 79

Tab.1 [14]

Tabulka 1 představuje souhrn jednotlivých rostlinných druhů a dobu měření. Další proměnné jako Q - průměry denních hodnot transpiračního toku (Q, kg H₂O den⁻¹), Q_{max} – maximální hodnoty (Q, kg H₂O den⁻¹), Sd._{max}Q – směrodatná odchylka, R_g - průměrné denní sumy globální radiace (MJ m⁻²den⁻¹), S – suma srážek (mm) označují naměřené hodnoty.

3.2.2. Klima a transpirace

Zvýšení průměrných ročních teplot, změna způsobů hospodaření (odlesnění, zornění a odvodnění) má značný vliv na procesy transpirace a evapotranspirace.

Podstatně se liší klima lesních horských masivů od klimatu podhorských zemědělských oblastí, pouze částečně zalesněných. Přičemž, za hlavní příčinu nelze pokládat obtížně rozlišitelnou nadmořskou výšku, ale spíše odlišně transpirující

porost. Ten v zemědělských oblastech transpiruje během vegetační sezóny méně než porost lesních oblastí. Je to dáno ze tří důvodů [3]:

- zemědělské porosty jsou tvořeny převážně obilím, což je stepní rostlina s krátkou vegetační sezónou;
- zemědělské oblasti jsou velkoplošně odvodněné systematickou trubní drenáží, půda má proto malou vodní retenční kapacitu;
- v zemědělských oblastech je nižší srážkový úhrn v době vegetační sezóny.

Transpirace hraje důležitou roli v ochlazení vzduchu. Chlazení v důsledku transpirace rostlin podstatně ovlivňuje energetickou bilanci pevnin. Je dokázáno, že do oběhu se v důsledku nedostatečné transpirace dostává nadměrné množství tepla oproti poměrům rostlin s dostatečnou transpirací. [3]

Z praktického hlediska lze znalost evapotranspiračních nároků plodin využít pro ovlivnění vodní bilance stanoviště na základě struktury porostu, délky trvání a doby nástupu vývojových fází porostu. [15]

3.3. Evapotranspirace

Evapotranspirace je souhrnným výparem ze dvou rozdílných povrchů, kdy výpar z vodního nebo půdního povrchu je označován jako evaporace a výpar z vegetace je označován jako transpirace. [5]

Rychlost ET je obvyklé vyjádřena v milimetrech za jednotku času. Jednotkou času může být hodina, den, desetiletí, měsíc nebo i celé vegetační období. Hloubku vodního sloupce lze vyjádřit pomocí energie přijaté na jednotku plochy. [16]

Kvantifikace ET je důležitá pro přesné meteorologické předpovědi, jakož i pro racionálnější využití vodních zdrojů. K dispozici jsou různé metody pro měření ET: lyzimetry, Bowenův poměr, systém eddy kovariance, scintilometry atd. Každá metoda má své vlastní silné stránky a omezení. [17]

3.3.1. Faktory ovlivňující evapotranspiraci

Meteorologické faktory

Sluneční radiace

Proces ET je určen množstvím dostupné energie pro výpar. Sluneční záření je hlavním zdrojem energie, díky kterému je možná přeměna velkého množství vody v páru. Skutečné sluneční záření dopadající na povrch závisí na prašnosti atmosféry a oblačnosti, které odrážejí a pohlcují většinu záření. [16]

Teplota vzduchu

Teplota okolního vzduchu přenáší energii do rostlin a řídí rychlost ET. Ztráta vody je vyšší za slunečného a teplého počasí, než za oblačného a chladného. [16]

Vzdušná vlhkost

Vlhké pole v suchých aridních oblastech spotřebovává velké množství vody kvůli přebytku energie a sušším podmínkám atmosféry. Ve vlhkých tropických oblastech, navzdory velkému množství energie, vysoká vlhkost vzduchu snižuje hodnoty ET. [16]

Rychlost větru

V případě, že vlhký vzduch není neustále nahrazován sušším vzduchem, hodnoty ET se snižují. [16]

Atmosférické faktory

Atmosférický tlak

Výpar ve vysokých nadmořských výškách je znatelnější kvůli nízkému atmosférickému tlaku, který je vyjádřen psychrometrickou konstantou. Vliv atmosférického tlaku vzduchu na výpočet ET nemá zásadní vliv, a proto pro výpočet ET stačí vědět střední hodnotu pro zkoumanou oblast. [16]

Latentní teplo

Latentní teplo vyjadřuje energii, která je potřebná pro přeměnu vody na páru při stálém tlaku a teplotě. [16]

Psychrometrická konstanta

Udává poměr měrného tepla (C_p) vlhkého vzduchu při konstantním tlaku k latentnímu teple (L_v) odpařování vody. [18]

3.3.2. Potenciální a aktuální evapotranspirace.

Potenciální evapotranspirace představuje maximálně možný výpar za daných stanovištních a klimatických podmínek. Aktuální evapotranspirace je takové množství vody, které se skutečně odpaří. Potenciální evapotranspirace má vyšší hodnoty a stanovuje se mnohem jednodušeji než aktuální. [19]

3.3.3. Aktuální evapotranspirace

Hodnota aktuální EP závisí na typu porostu a způsobu hospodaření na půdě. To ukázaly některé studie [20], ve kterých v letech 2006, 2007 a 2009 probíhala měření aktuální evapotranspirace na lokalitě Červený Újezd ve středních Čechách. Pro měření ET_a a ET_p byl použit měřicí systém BREB (Bowen Ratio-Energy Balance). Velikost pokusných ploch činila alespoň 1 ha. V roce 2006 probíhala od 18.5. do 27.7. stanovení ET_a a ET_p v porostech jarního ječmene (*Hordeum vulgare*). Základním způsobem zpracování půdy byla orba. Suma srážek spadlých za sledované období činila 146,5 mm a průměrná denní teplota vzduchu byla okolo 17,6 °C. Denní hodnoty ET_a se pohybovaly v rozmezí od 0,7 do 5,1 mm. Všeobecně vyšší hodnoty ET_a byly zaznamenány na plochách s mělkým kypřením. V roce 2007 (v období 22.4. - 17.7.2006) průměrné denní hodnoty ET_a se na oraných plochách pohybovaly v intervalu 1.45 až 4.6 mm a na plochách bez hospodářských zásahu v rozmezí 1.5 až 5.4 mm. Průměrné denní hodnoty Bowenova poměru (β), který vyjadřuje podíl mezi

energií zjevného a latentního tepla, dosahovaly vyšších hodnot na orané ploše. V roce 2009 probíhala měření v porostech ozimé pšenice (*Triticum aestivum*) v období od 12.4. do 23.7. Základní zpracování půdy pro ozimou pšenici (*Triticum aestivum*) představovalo mělké kypření. Denní hodnoty ET_a se pohybovaly v rozmezí od 0.5 do 4.4 mm. [20] Experiment prokázal pozitivní vliv zpracování půdy na transpirační nároky porostů.

3.3.4. Potenciální evapotranspirace

Správné stanovení potenciální evapotranspirace je důležité nejen pro zjištění množství vody v půdě, ale i pro podklady pro návrhy závlahových staveb i při řízení závlahového režimu. [21]

3.3.4.1. Výpočet potenciální evapotranspirace podle Papadakise

Papadakisova metoda byla v minulosti poměrně často využívána na pracovištích ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav). [21]

V ČR byla metoda použita ve studii [22], v níž výpočet potenciální ET vychází z následujícího vztahu:

$$ET_p = 5,625(e_{ms} - e_{mn}), \text{ kde:}$$

ET_p - potenciální evapotranspirace [mm.měs⁻¹];

e_{ms} - napětí nasycené vodní páry vypočítané z měsíčního průměru maximálních denních teplot vzduchu ve výšce 2 m nad zemí [hPa];

e_{mn} - napětí nasycené vodní páry vypočítané z měsíčního průměru minimálních denních teplot vzduchu ve výšce 2 m, od něhož byly odečteny 2 °C [hPa]

3.3.4.2. Penman – Monteith rovnice pro výpar z volné hladiny

Pro výpočet potenciální ET můžeme použít Penman-Monteith rovnice [23], která má následující tvar (zjednodušený tvar pro výpočet výparu z volné hladiny) [24] :

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Rn}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u)D, \text{ kde:}$$

Δ – je sklon křivky tlaku a teploty (hPa/K) - $[\partial e_0 / \partial T]$, kde e_0 je tlak nasycených par (kPa) a T je teplota (°C), obvykle se bere jako denní průměrná teplota vzduchu];

γ – je psychrometrický koeficient s typickou hodnotou 0,67 (hPa/K);

Rn – záření (MJ m⁻² d⁻¹);

λ – latentní teplo odpařování (MJ kg⁻¹);

D – je deficit tlaku par ve vzduchu (hPa), definovaný jako rozdíl mezi saturačním tlakem par a skutečným tlakem par, které jsou funkcí teploty a relativní vlhkosti;

E' - rychlost odpařování.

3.3.4.3. Budykův vztah

Princip je založen na předpokladu, že v oblastech s vysokým koeficientem odtoku (nizkým poměrem výpar/srážky) se hodnota potenciální ET blíží hodnotě skutečné ET. Naopak v oblastech aridního klimatu poměr blíží 1. [25]

Tzv. Budykova křivka je vyjádřena rovnicí [26] :

$$\frac{ET_a}{P_a} = \left[\theta \tanh\left(\frac{1}{\theta}\right) (1 - e^{-\theta}) \right]^{0,5}, \text{ kde:}$$

θ – aridity index, tj. poměr mezi potenciální ET a srážkami (PET/P)

Je velmi obtížné stanovit, která metoda výpočtu potenciální evapotranspirace je na základě empirických vzorců nejpřesnější. Vždy je zapotřebí vycházet z dostupných vhodných meteorologických podkladů a účelu výpočtu. [21]

3.3.5. Referenční evapotranspirace

Referenční evapotranspirace je výpar z hypotetického povrchu, který je velmi podobný standardnímu travnímu porostu, který má celý rok konstantní výšku (0,12 m), konstantní albedo (0,23), konstantní povrchový odpor (70 s.m^{-1}), maximální zápoj a optimální zásobování srážkovou vodou. [27]

Střední hodnoty referenční ET (ET_0), mm/24 h:

region	střední denní teploty		
	~10 °C	~20 °C	>30 °C
tropy a subtropy - humidní a semihumidní - aridní a semiaridní	2–3 mm 2–4 mm	3–5 mm 4–6 mm	5–7 mm 6–8 mm
mírný podnebný pás - humidní a semihumidní - aridní a semiaridní	1–2 mm 1–3 mm	2–4 mm 4–7 mm	4–7 mm 6–9 mm

Tab. 2 [16]

3.3.5.1. Penman – Monteithova rovnice

Pro výpočet referenční evapotranspirace nejvíc používanou metodou je rovnice Penmana – Monteitha, o které už byla zmínka v předchozí kapitole. Pro výpočet ET_0

z hypotetického povrchu pomocí metodiky FAO (Food and Agriculture Organization) lze použít rovnice ve tvaru [16]:

$$\lambda * ET = \frac{\Delta * (R_n - G) + \rho_a * c_p * \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta * \gamma * \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}, \text{ kde:}$$

ET = intenzita evapotranspirace [kg.m⁻².s⁻¹];

λ = skupenské (latentní) teplo vypařování neboli měrné teplo vypařování, λ = 2,45 MJ.kg⁻¹;

Δ = derivace tlaku nasycené vodní páry podle teploty vzduchu [kPa. °C⁻¹];

R_n = radiační bilance na povrch [kJ.m⁻².s⁻¹];

G = tok tepla v půdě [kJ.m⁻².s⁻¹];

ρ_a = hustota vzduchu při dané teplotě vzduchu a atmosférickém tlaku [kg.m⁻³];

c_p = specifické (měrné) teplo vzduchu [kJ.kg⁻¹. °C⁻¹];

e_s = tlak nasycené vodní páry při teplotě vzduchu [kPa];

e_a = aktuální tlak vodní páry [kPa], rozdíl e_s – e_a je sytostní doplněk;

r_a = aerodynamický odpor [s.m⁻¹];

r_s = povrchový odpor plodiny [s.m⁻¹];

γ = psychrometrická konstanta [kPa. °C⁻¹], γ = 0,66 pro teplotu vzduchu ve °C a tlak vodní páry v mb nebo hPa.

V metodice FAO jsou doporučeny následující vstupní meteorologická data [27]:

- průměrná denní teplota vzduchu [°C], počítaná z maximální a minimální teploty vzduchu jako jejich součet dělený dvěma;
- průměrná denní relativní vlhkost vzduchu [kPa], počítaná z maximální a minimální relativní vlhkosti vzduchu;
- denní trvání slunečního svitu [hodiny];
- průměrná denní rychlost větru, počítaná ze tří termínů: 7, 14, 21 hod. [m.s⁻¹].

Krom toho, je nutné znát geografické souřadnice, nadmořskou výšku a zeměpisnou šířku. [27]

3.3.5.2. Albedo

Albedo je bezrozměrná veličina, která udává, jak dobře povrch odráží sluneční energii, pohybuje se v rozmezí od 0 do 1. [28]

Hodnoty albedo pro vybrané typy povrchů:

povrch	albedo
sněhová pokrývka	70 %
půda a vegetační kryt	5–30 %
vodní plocha	2–70 %
písek	29–35 %
hlinitá půda	20 %
černozem	5–12 %
obilné pole	15–25 %
louka	18–30 %

Tab. 3 [29]

Albedo závisí na barvě, drsnosti, vlhkosti a dalších parametrech povrchu. Albedo vodních ploch je nižší, protože sluneční paprsky, které padají do vody, jsou ve značné míře pohlcované a snadno se rozptylují ve vodě. Veličina se mění od 4–5 % pro vodní plochy s velkou hloubkou do 70–90 % pro čistý a suchý sněhový pokryv. [30]

Z výše uvedené tabulky je vidět, že hodnoty albedo vodních ploch mají velký rozptyl. To je způsobeno tím, že vodní plochy nejsou homogenní a proces odražení a absorpce probíhá jinak než u ostatních povrchů. Mořský led má mnohem vyšší albedo ve srovnání s ostatními povrchy Země. Typické oceánské albedo je cca 0,06, zatímco mořský led má hodnoty od 0,5 do 0,7. To znamená, že oceán odráží pouze 6 % slunečního záření a zbytek absorbuje. Mořský ledový pokryv absorbuje méně a kvůli tomu povrch je chladnější. Sníh má ještě větší hodnoty albedo než mořský led. Sníh odráží cca 90 % slunečního záření. Albedo značně klesá s táním ledu.[28]

3.3.5.3. Koeficient půdního pokryvu (Crop coefficient)

Pro posouzení vláhové bilance porostu lze využít tzv. crop koeficienty. Crop koeficient (K_c) ukazuje vztah mezi referenční evapotranspirací a aktuální (skutečnou) evapotranspirací porostu. [31]

Hodnotu crop koeficientu vypočítáme podle vztahu:

$$K_c = ET_c / ET_0, \text{ kde:}$$

K_c – crop koeficient,

ET_0 – referenční evapotranspirace,

ET_c – aktuální evapotranspirace

Faktory ovlivňující koeficient půdního pokryvu (K_c):

1. typ kultury;
2. klima;
3. vegetační fáze;
4. výpar z půdy.

Když je půda vlhká, voda v ní má vysokou potenciální energii. Voda se pohybuje v půdě relativně volně a je snadno dostupná pro kořenový systém rostlin. V případě že potenciální energie v půdní vodě klesne pod prahovou hodnotu, říkáme, že vegetace je stresovaná vodou. [32]

Podle metodiky [16] K_c se dá spočítat následujícím způsobem:

$$K_c = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW}, \text{ kde}$$

TAW – celkové množství vody v kořenové zóně (mm);

D_r – spotřeba vody kořeny (mm);

RAW – okamžitě dostupná voda (mm).

3.3.6. Evapotranspirace za normálních podmínek (ET_c)

Evapotranspirace za normálních podmínek je výparem ze zdravého, plodného porostu, v němž jsou plodiny pěstované na velkých polích při dostatku půdní vody, přičemž porost je plně produkční za daných klimatických podmínek. [10]

3.3.7. Evapotranspirace v nestandardních podmínkách ($ET_{c \text{ adj}}$)

Tento typ evapotranspirace probíhá za podmínek, které jsou odlišné od těch standardních. To může být způsobeno například přítomností škůdců a chorob, vysokou salinitou půdy, nedostatkem vody nebo naopak podmáčením. Tyto faktory mohou ve značné míře snížit rychlost ET. Evapotranspiraci za nestandardních podmínek můžeme určit pomocí K_s (koeficientu vodního stresu) nebo K_c (koeficientu půdního pokryvu). [10]

3.3.8. Vegetační období a evapotranspirace

Vegetační doba rostliny je čas, kdy podmínky pro růst a vývoj rostlin jsou nepříznivější. V průběhu růstu se mění povrch rostliny, výška a plocha listů. Vegetační období lze rozdělit na několik fází: počáteční fáze, vývoj, střední fáze, závěrečná fáze. [16]

Počáteční fáze

Počáteční fáze trvá od termínu výsadby do dosažení 10% pokryvnosti. Délka období závisí na plodině, odrůdě, termínu výsadby a podnebí. Během tohoto období je plocha listů malá a evapotranspirace probíhá převážně jen z povrchu půdy. [16]

Fáze vývoje

Fáze vývoje trvá od dosažení 10% pokryvnosti do doby, kdy je celý povrch pokryt rostlinami. U obhospodařovaných porostů je jedním z efektivních způsobů určení celkové efektivní pokryvnosti tzv. index plochy listů (LAI), který udává poměr mezi střední celkovou plochou listů a plochou povrchu půdy. Během vývoje rostlin evapotranspirace už je hlavním procesem. [16]

Střední fáze

Střední fáze začíná momentem, v němž celý povrch již dosáhl efektivní pokrývnosti a končí začátkem zrání, který je obecně charakterizován stárnutím porostu – žloutnutím a opadem listů. V tomto období jsou hodnoty aktuální evapotranspirace nižší než hodnoty potenciální evapotranspirace. [16]

Závěrečná fáze

Koneční fáze trvá od začátku zrání do sklizně nebo celkového opadu listů. [16]

3.4. Metody měření evapotranspirace

ET můžeme měřit jak přímo v terénu, tak i pomocí nepřímých metod.

3.4.1. Nepřímé metody

3.4.1.1. Vodní bilance povodí

Metoda vodní bilance je vhodná pro velké plochy (povodí) i pro delší časové horizonty. Hodnotu evapotranspirace můžeme spočítat podle rovnice vodní bilance povodí:

$$ET = P - \Delta S - Q - D,$$

v němž veličina P označuje hodnotu srážek, ΔS – změnu množství vody v povodí, Q – odtok vody z povodí a D – doplňování podzemní vody.

Měření roční vodní bilance v ekosystémech je důležité pro pochopení funkčních vztahu mezi evaporací, srážkami a potenciální evapotranspirací. [33]

Metoda vodní bilance byla například použita ve studii [34], v níž byla sledována hodnota evapotranspirace porostu sójových bobů. Hodnoty ET byly měřeny na ploše 19 ha během letní sezony v letech 2012 a 2013 jihovýchodně od města Buenos Aires (Argentina).

Rovnováha vody v půdě v časovém intervalu Δt byla vyjádřeno jako:

$$SWC_t = SWC_{t-\Delta t} + PP_t - ET_t - Per_t - R_t,$$

kde:

SWC_t a $SWC_{t-\Delta t}$ – obsah půdní vody měřený v čase t a $t - \Delta t$;

PP_t – srážky.

ET_t - evapotranspirace.

Per_t - perkolace; R_t – povrchový odtok.

Obsah půdní vody, srážek, hodnoty perkolace a odtoku lze použít k odhadu ET. Výsledky ukázaly, že střední hodnota ET_a za celé období činila 3 mm za den, směrodatná odchylka činila 1,2 mm za den.

3.4.1.2. Bowen Ratio

Energie, která je dostupná na zemském povrchu je spotřebována především jako turbulentní tok tepla (H) a latentní energie (LE). Poměr těchto hodnot je tzv. Bowenův poměr (β). [35]

$$\beta = \frac{H}{LE}$$

Metoda Bowenova poměru je založena na analýze radiační bilance stanoviště, během které se měří teplota a vlhkost vzduchu minimálně ve dvou výškách. Postup je určen pro měření toku a je odvozen z energetické bilance podkladového povrchu. [36] Pomocí této mikrometeorologické metody se odhaduje hustota toku vodní páry, hustota toku latentní energie a hustota turbulentního tepelného toku z povrchu (teplo na ohřátí vzduchu). Všechny tyto typy hustoty toku získáme za současného měření rozdílu tlaku vodních par, rozdílu teplot vzduchu ve dvou výškách (nad půdou nebo nad vegetací), změřením intenzity záření a objemu tepelného toku z půdy. [37]

Bowenova metoda je vyjádřena rovnicí:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2}, \text{ kde}$$

β - Bowenův poměr

H – tok zjevného tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

LE – tok latentního tepla výparu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

γ - psychrometrická konstanta

T_1 – teplota vzduchu ve 2 m nad zemí [$^{\circ}\text{C}$]

T_2 – teplota porostu [$^{\circ}\text{C}$]

e_1 – tlak vodní páry ve 2 m nad zemí [kPa]

e_2 – tlak vodní páry těsně nad porostem [kPa]

Pro výpočet Bowenova poměru je potřeba znát tlak vodní páry. Ten lze vypočítat buď na základě měření suché a vlhké teploty za pomoci psychrometru nebo na základě měření relativní vlhkosti vzduchu. [38] Lze říci, že je-li Bowenův poměr $\beta > 1$, je klima suché a je-li Bowenův poměr $\beta < 1$, je klima vlhké. [39]

3.4.2. Přímé metody

3.4.2.1. Lysimeter

Lysimetr měří hmotnost vody v půdě. Čistý tok vlhkosti z půdy lze odhadnout na základě změny hodnoty hmotnosti. [40] V současné době jsou lysimetry jednou z nejúčinnějších metod měření ET. Jejich nevýhodou jsou vysoké náklady na instalaci a údržbu. [41]

Měření pomocí lysimetrů představuje pouze bodové měření, které jsou následně aproximované na velké plochy. Ne vždy mohou být výsledky lysimetrů

reprezentativní. Jako příklad bychom mohli uvést proces zkoumání heterogenního prostoru. [42] Stále jde ale o účinný nástroj pro přímé měření, a to díky systému vyvážení umožňující odvodit hodnotu ET z mnoha záznamů s nejvyšší přesností ve srovnání s nepřímými metodami měření ET. [23] Krom toho, jsou lysimetry často využívány pro kalibraci a validaci evapotranspiračních modelů. [43]

Příkladem měření ET_a ruderálního stanoviště a stepi pomocí gravitačních lysimetrů je studie [23], v níž byla spočítána hodnota potenciální ET pomocí Penman-Monteith rovnice. Dva lysimetry (výrobce UGT-Muencheberg, Germany and Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Germany) měly plochu povrchu 1 m^2 a hloubku 2 m. Hmotnost nádoby celkem činila přibližně 4000 kg. Čidla měřila hmotnost s přesností $\pm 20 \text{ g}$. Interval záznamu byl vymezen na 1 hodinu. Ve výsledku hodnota ET_a nabývala hodnot 0,1 až 6,9 mm/den, hodnota ET_p se pohybovala v rozmezí od 2 do 8,3 mm/den. Rozdíl mezi střední hodnotou ET_a měřenou pomocí lysimetrů a ET_p spočítanou Penman-Monteith rovnicí je - 91,1 % (ruderální stanoviště a step).

Ve studii byly [37] hodnoty ET měřeny metodou BREB (Bowen Ratio Energy Balance) a lysimetru. Bylo vybráno několik reprezentativních dní, které mají následující podmínky: vysoká radiační zátěž a úměrně vysoké LE (tok latentního tepla výparu), tyto podmínky jsou ale nejméně optimální pro měření ET metodou BREB. V následující tabulce jsou ukázány rozdíly hodnot ET:

den	mm	
	BREB	Lysimeter
11	3,57	3,48
12	4,4	4,23
13	4,59	4,42
14	7,11	5,99

Tab.4 [37]

Měření pomocí lysimetrů je považováno za standart pro měření ET, a proto to je jednou ze spolehlivějších metod. [37]

3.4.2.2. Eddy covariance

Metoda eddy covariance byla poprvé popsána před 50 lety, v současné době je široce využívanou metodou. [44] Eddy covariance je mikrometeorologická metoda, která umožňuje sledovat výměnu plynů, vody a energie mezi ekosystémy a atmosférou. Díky ní je možné zjistit hodnoty toku výpočtem kovariance fluktuací ve vertikální složce rychlosti větru. [45]

Pro použití metody EC by měly být splněny následující předpoklady [46].:

1. Měření, které jsou prováděna v jednom bodě, by měly být reprezentativní i pro ostatní oblasti.
2. Tok větru je zcela turbulentní;
3. Krajina je relativně homogenní;
4. Kolísání hustoty vzduchu je zanedbatelné.;
5. Chybí divergence nebo konvergence vzdušných proudů.

EC systém může měřit pouze malé víry a není schopen měřit velké víry ve spodní mezní vrstvě. [44]

Nepřesnosti metody a možné řešení:

Možné chyby	Řešení
zkreslení vln	oprava frekvenčních charakteristik
časová nekonzistentnost	počítání se zpožděním
odlehle hodnoty/šum	odstranění odlehlých hodnot
nesprávná instalace	rotace souřadnic
kolísání hustoty vzduchu	korekce na kolísání
chyba ve výpočtech tepelného toku v anemometru	akustická korekce
roztroušení absorpčního pásu	návrh zařízení, korekce pro rozšíření infračerveného absorpčního pásu
spektroskopické efekty	není obecná přijímaná korekce
absorbování kyslíku	korekce na absorbování kyslíku
mezery v datech	změny v metodice/testy Monte Carlo/GF

Tab. 5 [46]

Použití otevřeného analyzátoru u EC je omezeno v deštivých dnech. [47] Jako alternativu výzkumníci nabízejí možnost použití techniky EC, která je založena na analyzátoru QCLAS-EC s uzavřenou plochou. [47] Koncentrace H₂O byla měřena pomocí analyzátoru plynů s uzavřenou plochou (model: QC-TILDAS-DUAL, Aerodyne Research Inc., USA) založeného na kaskádové laserové absorpční spektroskopii (QCLAS), který mohl současně měřit koncentrace N₂O a CO₂. Trojrozměrný ultrazvukový anemometr zachycoval rychlosti větru ve třech směrech (CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA). Plyn byl poháněn externí vakuovou pumpou (XDS35i, Edwards, Velká Británie). Pro výpočet půlhodinových toků vodní páry a latentních tepelných toků (spočítaných na základě údajů o koncentraci vody a vertikálních údajích o rychlosti větru) byl použit software EddyPro. Experiment byl proveden během čtyř vegetačních období. Výsledky ukázaly, že systém Eddy Covariance s uzavřenou plochou (closed path) je mnohem účinnější, než systém Eddy Covariance s otevřenou plochou (open path). Dále studie ukázala, že hodnota ET měla silnou korelaci se sklizní, výsadbou a zavlažováním a nejmenší vliv na ET mělo období hnojení.

Gap filling techniky

GF umožní doplnit chybějící hodnoty v časových řadách, například skrze metody průměrné denní variace (MDV), vyhledávací tabulky (LUT) a nelineární regrese (NLR). [48]

Metoda průměrné denní variance

MDV je interpolační technika, v níž je chybějící hodnota nahrazena průměrnou hodnotou sousedních dnů v tu samou denní dobu. [48]

Vyhledávací tabulky

Ve vyhledávací tabulce jsou data spojena podle různých proměnných (světlo, teplota), které mají podobné meteorologické podmínky. Pomocí této metody lze „vyhledat“ chybějící hodnoty v tabulce ze zaznamenaných hodnot s podobnými charakteristiky. [49]

Nelineární regrese

Metoda je založena na parametrizovaných nelineárních rovnicích vyjadřující empirické vztahy mezi sledovanou veličinou a proměnnými daného prostředí. [48]

3.4.2.3. Scintillometry

Scintillometr se skládá z částí – vysílač a přijímač, tyto komponenty jsou odděleny zadanou délkou cesty. Používá se paprsek elektromagnetického záření o známé vlnové délce přenášený na relativně velkou vzdálenost (100 m - 4,5 km). Intenzita paprsku kolísá v důsledku absorpce a difrakce, když narazí na víry ve vzduchu. Tyto fluktuace nebo scintilace lze použít ke stanovení strukturálního parametru indexu lomu vzduchu, který lze použít pro výpočet strukturálních parametrů pro teplotu a vlhkost. [41] Scintillometry pracující na vlnových délkách $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ se nazývají optické. Mikrovlnné scintillometry jsou takové, u nichž délka vln činí $\lambda \approx 1\text{--}10 \text{ mm}$. Optické scintillometry detekují především teplotní výkyvy, zatímco mikrovlnné jsou citlivější na scintilaci vlhkosti a teploty. [50]

Výhodou scintillometrů je schopnost měřit citelné a latentní tepelné toky ve velkých prostorových měřících. [51]

Index lomu vzduchu

Vztah mezi rychlostí šíření vlnění ve vakuu a v atmosféře udává index lomu vzduchu.

Ačkoli vzduch je velmi řídké prostředí, má nezanedbatelnou hustotu, která se mění v závislosti na jeho aktuálních vlastnostech. Index lomu vzduchu závisí zejména na:

- plynném složení vzduchu (významný vliv oxidu uhličitého – CO);
- tlaku vodní páry v atmosféře;
- teplotě vzduchu;
- tlaku plynné složky vzduchu (atmosférický tlak bez tlaku vodní páry). [52]

Ve studii [41] byly srovnány přesnosti měření ET pomocí scintillometrů a lysimetrů. Přístroje byly instalovány na zavlažovaném poli s čirokem (*Sorghum bicolor*) v období

od 29. července do 17. srpna 2015 a na poli s kukuřicí (*Zea mays*) v období od 23. června do 2. října 2016. Studie ukázala, že měření pomocí scintillometru má menší chybovost pro měření denních hodnot ET. V následující tabulce jsou ukázány výsledky regresní analýzy srovnání měření ET pomocí scintillometru a lysimetru [41]:

data	RMSE	%RMSE	R ²	sklon
ET (hod.)	0.10 mm	40	0.89	0.97
ET (denní)	0.75 mm	13	0.87	0.91

Tab. 6 [41]

4.1. Metodika

Sběr dat probíhal pomocí EC (LI-COR 7200RS) a scintilometru (LAS Mk II) na území střediska živočišné výroby Amálie. Důležitou součástí práce je porovnání výsledků měření aktuální evapotranspirace, které byly změřené pomocí scintilometru a eddy covariance věže za použití vhodných gap filling metodik. Aktuální evapotranspirace byla porovnávaná s hodnotami potenciální evapotranspirace (potenciální evapotranspirace vypočtena podle následujících metodik: Penman – Monteith, Hargreavesova, Thornthwaite metody) v jednotlivých měsících roků 2020 a 2021. Pro zjištění nejvhodnější nepřímé metody byla použita nelineární regrese (GLM) a Spearmanův korelační koeficient.

Na základě metodik, analýzy terénu a vědeckých článků byla navržena lokalita pro vhodnější umístění eddy covariance věže v polní a lesní části. Další součástí práce je výpočet energetické bilance jednotlivých lokalit a vizualizace veličin, které mají značný vliv na průběh evapotranspirace.

4.1.1. LI-COR 7200RS

LI-COR 7200RS je nedisperzní analyzátor plynů, měřící množství oxidu uhličitého a vodní páry *in situ*.

Zařízení je navrženo speciálně pro metodu eddy covariance. Měří vysokofrekvenční kontaktní hodnoty CO₂ a H₂O s dobrým rozlišením. Zvládne rozlišit široké spektrum teplot (od -25 do 50 °C), je odolný proti dešti, sněhu a námraze. Kvůli nízké spotřebě energie je možné nainstalovat zařízení skoro kdekoli. Zařízení měří toky CO₂ a H₂O v dešti a není nutná korekce hustoty plynu. Model LI-7200RS má nedisperzní infračervený analyzátor (NDIR), který měří absolutní hodnoty. Systém poskytuje vysoce kvalitní data pomocí zjišťování teploty a tlaku. Získávání teplot probíhá na dvou místech: přesně před vstupem vzduchu do otvoru a po vypouštění. Hodnoty tlaku jsou měřeny uprostřed otvoru. LI-COR 7200RS generuje infračervený paprsek na různých délkách vln. V měřicím pouzdře nepřetržitě se střídají paprsky dvou délek: pohlcované a nepohlcované měřeným plynem. Modulace zdroje infračerveného záření je zajištěna otáčením kola přepínače s rychlostí 150 otáček/s. Zpracování digitálního signálu zahrnuje demodulaci a převeden změřeného signálu v jednotkách hustoty. [46]

Jak již bylo uvedeno v teoretické části této práce, vzdušné toky nad zemským povrchem můžeme představit jako horizontální proudění velkého množství rotujících vírů a platí, že:

- čím blíže jsme k zemskému povrchu, tím více převládají menší víry;
- ve vyšších vrstvách převládají větší víry;
- malé víry rotují s větší rychlostí a velké naopak s menší.

Kvůli tomu by měly být měřicí zařízení univerzální, což znamená, že by měla měřit ve vysoké frekvenci a měla by být citlivé rovněž k malým změnám sledovaných parametrů. Konstrukce by měla být taková, aby nedocházelo k narušování toků. Mikrostruktura povrchu by měla splňovat aerodynamické požadavky tak, aby nedocházelo k vytváření velkého množství mikroturbulencí. Pokud jsou tyto podmínky splněny, je možné provádět měření i v nižších výškách. [46]

Důležité je, aby nebyla konstrukce věže a konfigurace zařízení příliš masivní (zejména v blízkosti anemometru), a to tak, že by bylo zabráněno vytváření překážek pro normální proudění vzduchu.

Výhody LI-COR 7200RS [46]:

- minimální ztráta dat kvůli srážkám;
- absence problému s ohřátím povrchu, jelikož měření momentálních hodnot teploty plynu probíhá uvnitř pouzdra;
- při nízkých teplotách je možné zajistit zahřívací systém pro prevence vzniku jinovatky;
- není potřeba časté kalibrace;
- nízká spotřeba energie při použití krátké trubky.

Kalibrace zařízení

LI-COR 7200RS nevyžaduje častější kalibrace než ostatní zařízení (LI-7500A a LI-7500RS). Nicméně LI-7200RS podle potřeby můžeme kalibrovat přímo na věži pomocí automatického systému kalibrace s následujícími intervaly: jednou za hodinu, měsíc nebo rok. Interval kalibrace závisí na technice měření a požadavcích výzkumníků. Ve většině případech pravidelné čištění pouzdra je důležitější než kalibrace. [46]

4.1.2. LAS Mk II

LAS (Large Aperture Scintillometr) Mk II je velké optické zařízení, které má v průměru 150 mm velký otvor určený k měření struktury plochy indexu lomu vzduchu (C_n^2) po vodorovné délce dráhy od 100 m do 4,5 km. Když je na stínítko správně nainstalováno, délka se může pohybovat od 100 m do 1 km. Zařízení má vysílač a přijímač pro měření intenzity fluktuace ve vzduchu (scintilaci), tyto části jsou od sebe

odděleny několika kilometry. Měřené scintilace lze vyjádřit jako strukturní parametr indexu lomu vzduchu (C_n^2). Světelný zdroj vysílače pracuje na vlnové délce, jejíž hodnota je blízká infračervené oblasti (850 nm). Při takových vlnových délkách jsou pozorované hodnoty scintilaci primárně způsobeny turbulentními teplotními výkyvy (fluktuacemi). Proto naměřené hodnoty C_n^2 lze kombinovat s časově a prostorově koherentními meteorologickými pozorováními teploty vzduchu, rychlosti větru a tlaku k odvození citelného tepelného toku volné konvekce (H_{free}). Sada meteorologických senzorů je k dispozici a může být připojena k přijímači. Když jsou data exportována do příloženého softwaru EVATION lze vypočítat povrchový tepelný tok (H) a následně hodnoty latentního tepelného toku a ET. LAS Mk II často používají ve studiích energetické a vodní bilance. [53]

5. Praktická část

5.1. Popis lokality

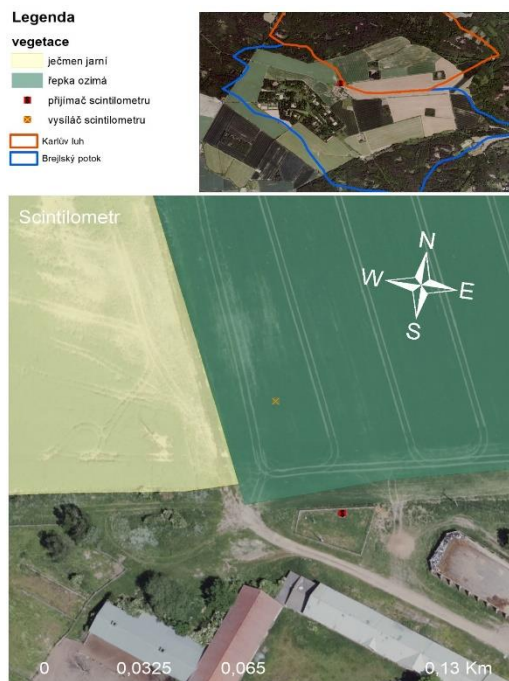
Zařízení je lokalizováno vedle střediska živočišné výroby Amálie (271 01 Ruda). Lokalita se nachází v oblasti povodí Brejlovského potoka a Karlova luhu.

Scintilometr se nachází na souřadnicích 50.1073519N, 13.8457361E v nadmořské výšce 452 m. n. m., kde byla v roce 2019 pěstovaná řepka ozimá (*Brassica napus*).

Eddy covariance je lokalizován na souřadnicích 50.1007989N, 13.8507381E v nadmořské výšce 426 m. n. m. na poli s vojtěškou (*Medicago sativa*).



Mapa 1

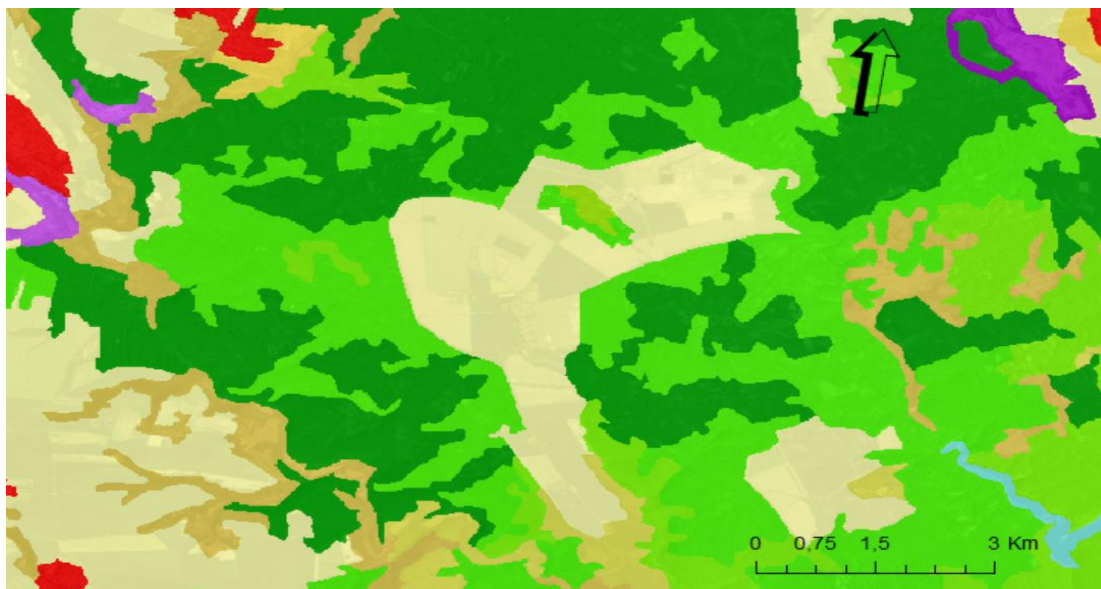


Mapa 2

5.1.2. Land use a land cover

Území je hospodářsky využíváno, přičemž v roce 2019 byly na tomto území pěstovány následující obiloviny: ječmen jarní a ozimý (*Hordeum vulgare*), vojtěška (*Medicago sativa*), řepka ozimá (*Brassica napus*). [54]

Na následující mapě je znázorněn *land use* ve zkoumané lokalitě (legenda viz přílohy).



Mapa 3 [55]

5.1.3. Geologie a půda

Ve studii [56] bylo zjištěno, že vlastnosti půdy máji vliv na hodnoty ET, přesněji řečeno, že půdy s jemnou strukturou a mělkou hladinou podzemní vody a malým podpovrchovým odtokem měly ve většině případech vyšší hodnoty ET a nižší hodnoty Bowenova poměru. V půdách mělkých a kamenitých s vyšším obsahem písku hodnoty ET byly nejnižší.

Geologické podloží v lokalitě bylo tvořeno převážně břidlicemi a droby. [57]

Z geologické mapy lze vyčíst, že se v dané oblasti nacházejí de facto pouze (s výjimkou kvartéru) barrandienské zpevněné sedimenty kralupsko-zbraslavské skupiny. V této lokalitě byl proveden geofyzikální průzkum pomocí vrtu. Vrt BP-1 zachytil při povrchu 7 m kvartéru (z větší části tvořeného propustnou spraší) a v hloubce až do 14 m cenomanský slínovec perucko-korycanského souvrství. Až ve větších hloubkách byly zachyceny barrandienské břidlice a vrt narazil na hladinu podzemní vody. [58]

Půdní typ v lokalitě č. 1 (scintilometry): fluvizem modální (středně těžký substrát).[59]

Půdní charakteristika:

Obsah humusu v ornících zemědělských půd činí 1,7 až 2,2 % a zvyšuje se při nárůstu acidifikace a oglejení. Tento typ půdy se vytváří především v rovině nebo v mírně zvlněném reliéfu. [60]

Půdní typ v lokalitě č. 2 (eddy covariance): kambizem modální (středně těžké až lehké substráty). [59]

Půdní charakteristika:

Půdy se formují převážně ve svažitých podmínkách pahorkatin, vrchovin a hornatin, v menší míře (sytké substráty) v rovinnatém reliéfu. V hlavním souvrství dochází obecně k posunu zrnitostního složení do střední kategorie ve vztahu k bazálnímu souvrství, k čemuž přispívá i jejich obohacení prachem. [60]

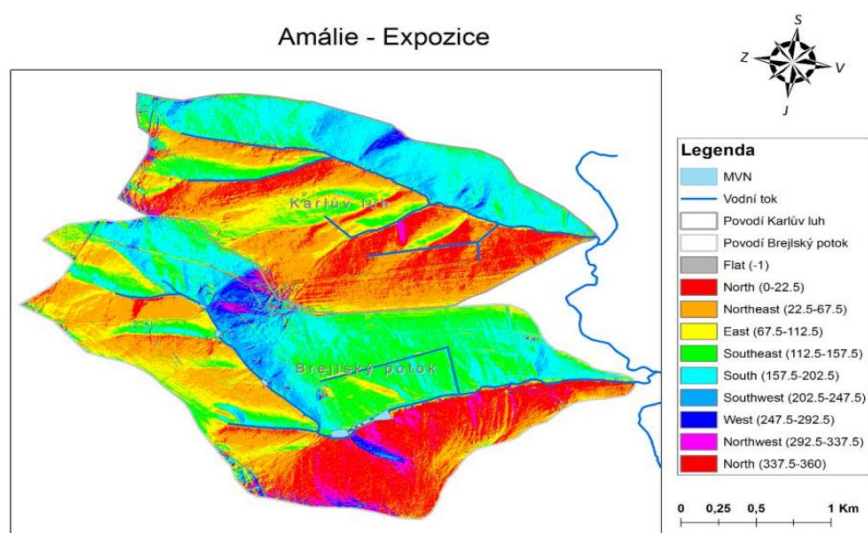
Půdy se vyskytují v širokém rozmezí klimatických a vegetačních podmínek. Původními společenstvy jsou listnaté a smíšené lesy (jedle, buk, dub). [60]

5.1.4. Klimatické podmínky

Průměrná denní rychlost větru je 2,5 – 3 m/s. [61] Průměrný úhrn srážek je 500 – 520 mm/rok. [62] Průměrná teplota vzduchu za rok 2020 činila cca 10 °C. [63]

Na základě teploty byla vypočítána potenciální evapotranspirace (ET_p) pomocí vztahu založeném na teplotě a potenciální radiční bilanci. [64] Potenciální evapotranspirace byla odhadnuta na 592 mm/rok. Výsledek přesahuje hodnoty srážek. [65]

Expozice



Mapa 4 [66]

5.1.5. Hydrologické poměry lokality

Lokalita se nachází v oblasti povodí řeky Labe. Má hydrologické číslo 6230 (Krystalinikum, proterozoikum a paleozoikum v povodí Berounky). [67]

Zájmové území spadá do ochranného pásma vodního zdroje 2. stupně. Je možné jej rozdělit na dvě malá povodí, a to na povodí potoka Karlova luhu 3,3 km² a Brejlského potoka 4,4 km². Toto povodí ústí od Klíčavy, toku 4. řádu. [65]

Povodí Karlův luh (scintilometr)

Délka povodí	3 276 892 m ²
Lesní plochy	2 101 823 m ²
Orná půda	1 175 069 m ²
Vodní plochy	0 m ²
Průměrná nadmořská výška	426,44 m. n. m
Převládající expozice	východní
Průměr sklonu povodí	9,40 %

Tab. 7 [66]

Povodí Brejlský potok (EC)

Délka povodí	4 436 068 m ²
Lesní plochy	1 859 474 m ²
Orná půda	2 558 927 m ²
Vodní plochy	17 667 m ²
Průměrná nadmořská výška	428,6 m. n. m.
Převládající expozice	jihovýchodní
Průměr sklonu povodí	7,70 %

Tab. 8 [66]

5.2 Data

Analýza dat byla provedena pomocí softwaru EddyPro, Tovi a R. K dispozici jsou data od roku 2020 a 2021.

5.2.1 Významnost umístění přístroje

Vhodné umístění zařízení je důležité pro získání co nejpřesnějších výsledků meteorologických měření. Ve většině případech by měla mít plocha reprezentativní charakter pro zkoumanou lokalitu, dalším požadavkem je, aby se v blízkosti nevyskytovaly překážky jako jsou stavby, dřeviny atd. [68]

Footprint

Footprint je oblast, kterou je schopen měřit přístroj na věži. Je to oblast z návětrné strany, od níž se k věži pohybují toky. [46]

Footprint se značně zvětšuje se zvýšením výšky. Správné stanovení oblasti měření je jednou z nejdůležitějších součástí experimentu.

Footprint závisí především na [46]:

- výšce, na níž probíhá měření;
- homogenitě povrchu;
- atmosférické stratifikaci.

Výška

Ve výšce 1,5 m více než 80 % naměřených hodnot ET je z oblasti 80 m. Plocha o rozměru 5 m kolem zařízení nemá vliv na kvalitu měření ET. [46]

Ve výšce 4,5 m více než 80 % naměřených hodnot ET jsou z oblasti 450 m a plocha o rozměru 32 m okolo zařízení nemá vliv na kvalitu měření ET. [46]

V době, kdy měření probíhalo výška porostu činila 0,25 m (EC).

Homogenita povrchu

Homogenní povrch je důležitou podmínkou v experimentech. Je nutné brát v úvahu skutečnost, že čím povrch je méně homogenní, tím se zmenšují hodnoty footprintu. [46]

Ve výšce 1,5 m (nehomogenní povrch) je 80 % hodnot ET zjištěno z oblasti 80 m. Pokud je povrch homogenní, oblast footprintu dosahuje 300 m. [46]

Atmosférická stratifikace

Ve výšce 1,5 m a při výšce rostlinného povrchu 0,6 m v podmínkách silně nestabilní atmosférické stratifikaci bude hodnota footprintu činit 50 m kolem stanice. Při neutrální stratifikaci bude mít footprint hodnoty mezi 5 až 250 m od stanice. Pokud bude stratifikace stabilní, footprint může být v rozmezí 15 až 500 m od měřicí stanice. [46]

5.2.2 Nedostatky v současném umístění

V aktuálním umístění jsou následující nedostatky:

Scintilometr

- nekorektní vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem optického signálu (bylo vyřešeno pomocí odstínění části emitovaného záření);
- přítomnost budovy cca 26 m od zařízení.



Foto 1 - Scintilometr



Foto 2 - Oblast footprintu

Eddy Covariance

- Povrch není reprezentativní;
- oplocení může nadohodnocovat vertikální složku proudění;
- nesprávná orientace vůči sklonu okolních pozemků;
- zanášení filtru kvůli vysoké prašnosti okolí.



Foto 3 - Eddy Covariance věž



Foto 4 - Oplocení a oblast footprintu

5.2.2 Návrh umístění

Pro získání kvalitních dat, je důležité brát v úvahu následující parametry: výšku věže, homogenitu prostředí a atmosférickou stratifikaci. Mezi další podmínky řadíme:

- reprezentativní povrch;
- respektování atmosférických parametrů (především směr větru);
- přístupnost a snadná instalace;
- absence budov a dalších objektů, které mohou ovlivnit toky;
- vhodný sklon okolních pozemků;
- možnost připojení na elektřinu a snadná konektivita dat.

Polní část

Pro zjištění ET z polí je vhodné použít EC. Vzhledem ke skutečnosti, že studované území je hospodářsky využíváno, je tímto splněna podmínka homogenity území, ale je nutné brát v potaz, že výška porostu nemusí být konstantní, a proto je nutné občas měnit výšku věže. Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, pokud měření bude probíhat ve výšce 4,5 m, hodnota footprintu může být v rozmezí cca 400 až 450 m.

Podle osevního plánu [54] na dané lokalitě je pěstován podsev vojtěšky. V případě, kdy v lokalitě budou pěstovány vysoké hospodářské rostliny, jako je kukuřice setá (*Zea mays*), je možnost instalace stožáru a regulace dle výzkumných požadavků.

Na následující mapě je znázorněno potenciální vhodné umístění EC. Umístění je vhodné z následujících důvodů:

- jihozápadní směr větru;
- homogenita povrchu, poloměr kružnici na mapě činí 300 m a je vidět, že footprint ze větrné strany je homogenní;
- absence překážek, přičemž ani polní cesta by neměla mít potenciální vliv na kvalitu měření;
- díky otevřenému terénu je snadné použití slunečných baterii s možností instalace elektrického zdroje.

Legenda

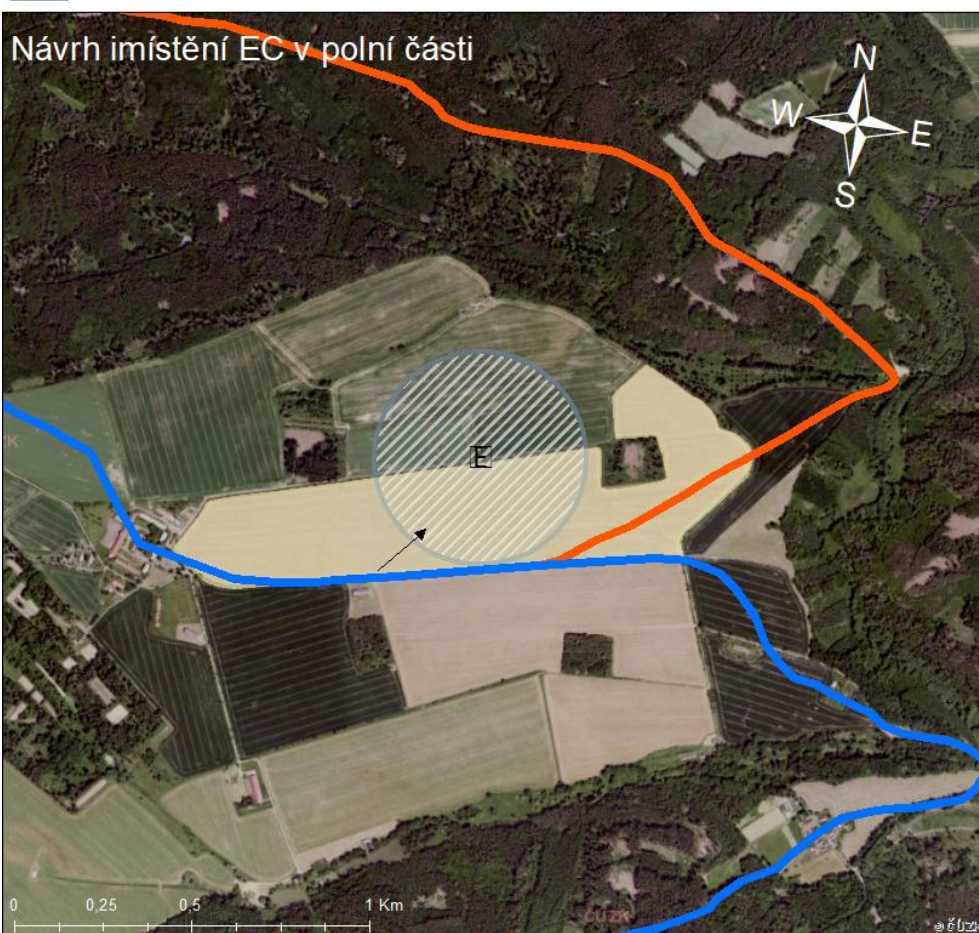
- ⓔ EC
- převládající směr větru

Povodi

- ▭ Břejlovský potok
- ▭ Karlův luh

vegetace

- ▭ podsev vojtěšky
- ▭ 300 m



Mapa 5



Foto 5 - Navrhována lokalita

Lesní část

Nejsložitější otázkou je vhodné umístění měřicí stanice v lesní části, neboť je potřeba řešit napojení na energetickou síť. U otevřeného analyzátoru stačí instalace solárních panelů na věži. U uzavřeného analyzátoru je nutné připojení na energetickou síť.

Problémem lokality je skutečnost, že porost není zapojený a sběr nočních dat může být komplikovanější. Důsledkem je vytváření silné inverzní vrstvy. Jak bylo prokázáno [69], hustší lesy mají v noci vyšší turbulence a slabší inverzi.

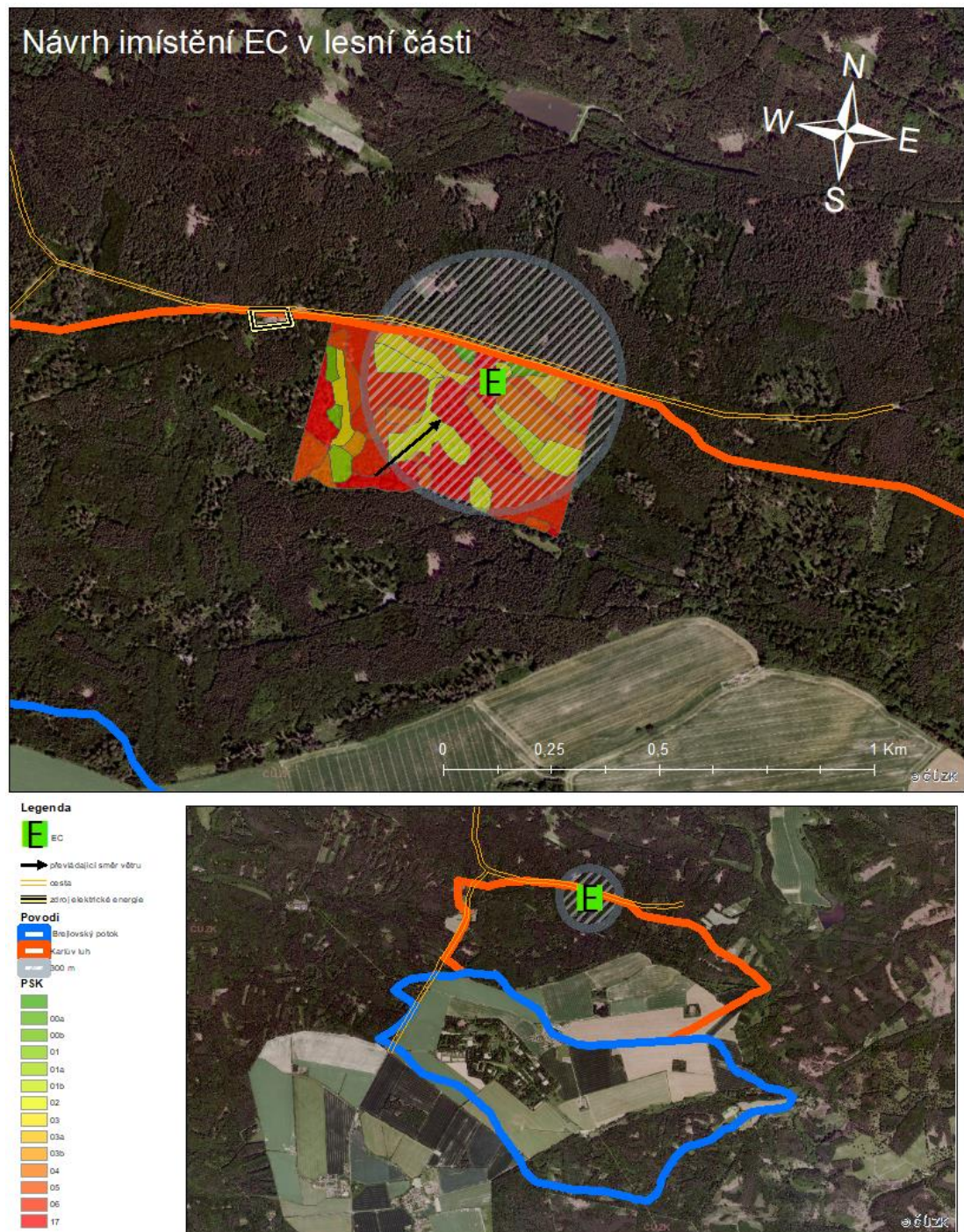
V tomto případě je jedním z nejdůležitějších parametrů výška, v jaké by měl být nainstalován systém Eddy Covariance. A proto je nezbytné využití stožáru. Když chceme měřit výpar ve složitějším terénu, například v podmínkách ne příliš zapojeného lesa, je důležité dávat pozor na velikost footprintu. Jak bylo prokázáno ve studii [70], velký footprint nepřispívá k dobrému odhadu výparu v krajině. Byla pozorovaná tendence, že s větší výškou v datech se častěji vyskytují záporné hodnoty.

Pro zjištění nejvhodnější výšky při instalaci EC je důležité brát v úvahu následující skutečnosti.:

- Pokud je zařízení nainstalováno příliš vysoko, dostáváme data z oblasti, která nejsou v zájmu experimentu.
- Pokud je zařízení nainstalováno příliš nízko, EC systém neregistruje toky, které jsou přenášeny malými víry.

Optimální výška měla by být o 1,5 až dvakrát vyšší než porost. [46] Což je docela problematické u lesních pozemků.

Pro výpočet výparu v lesních pozemcích je důležité počítat s indexem listové plochy (Leaf Area Index), zejména pro použití Gap Filling technik. [71]



Mapa 6

Ve studii [72] měření probíhalo v modřínovém lese, který se nachází na levém břehu řeky Lena (20 km severozápadně od města Jakutsk v Rusku). Dominantní dřevinou je modřín (*Larix cajanderi*) s příměsí břízy (*Betula pendula*) a vrby (*Salix bebbiana*). Podrost pokrývala převážně brusinka obecná (*Vaccinium vitis-idaea*) ve směsi s několika bylinami. V poslední době vyrostly mladé břízy a vrby, které vytvořily

zápojovou vrstvu podrostu. Terén této lokality byl relativně plochý s mírným severním sklonem a zamokřenou plochou (cca 0,5 ha) nacházející se asi 350–400 m severně od věže, jejíž střed tvoří rašelinště. Výška koruny tohoto lesa byla odhadnuta na 19,8 m, 20,5 m a 20,7 m pomocí dat ze sčítání stromů z let 1998, 2003–2004 a 2010. Výška vrchlíku, označená veličinou h (m), k roku 2016 byla měřena kolem 21 m. Hodnota footprintu činila 300–400 metrů. Uzavřený infračervený analyzátor LI-7200 a ultrazvukový anemometr WindMaster byly nainstalovány na vrcholu vyhlídkové věže, ve výšce 34 m od země. Byla zjištěna náhodná chyba toku, která byla způsobena pouze instrumentálním šumem a stochastickou povahou atmosférické turbulence.

Problematika měření ET u mokřadů

Ve studii [73] byla sledovaná ET v lokalitách s mokřady ve střední Evropě. Přístroje byly instalovány na stožáru ve výšce 3,7 m nad úrovní terénu. Data byla zaznamenávána při frekvenci 10 Hz. Složky radiační bilance se měřily pomocí síťového radiometru CNR1 (Kipp&Zonen, Nizozemí) v povodí Biebrzy, nacházející se v severovýchodním Polsku.

Vlhkostní podmínky výrazně ovlivňují rychlost odpařování. V ročním průběhu deficitu tlaku par je patrná výrazná sezónnost, přičemž nejvyšší hodnoty se vyskytují v létě. V zimním období je naopak deficit tlaku par nízký (méně než 5 hPa), což ukazuje na podmínky podobné podmínkám nasycení vzduchu vodní párou. V jarním a letním období průměrné denní hodnoty deficitu tlaku par rostou. [73]

Výsledky denních úhrnů evapotranspirace v létě, získané pomocí metody Eddy covariance, jsou zcela podobné výsledkům získaným pro bažinaté oblasti v Evropě, na Sibiři a v Kanadě. Denní úhrny na úrovni 2–3,5 mm byly získány během několika týdnů letních měření na mokřadech zarostlých rákosem (*Phragmites*), nebo také na vlhkých loukách v jižní Anglii. V severním Německu a Kanadě je rovněž evapotranspirace v létě z povrchů bažin, kde dominuje rákos (*Phragmites*), charakterizována denními úhrny na úrovni 2–4 mm/d⁻¹. Podobné hodnoty denních úhrnů evapotranspirace jsou typické pro mokřady v severozápadním Rusku nebo západní Sibiři, ale v obou případech dominantní vegetace je rašeliník (*Sphagnum Moss*). [73]

5.3. Analýza dat

Analýza dat je další důležitou součástí realizace experimentu. V dnešní době je k dispozici řada softwarových programů, které mohou usnadnit práci s velkým počtem dat.

Filtrace dat je nedílnou součástí analýzy. Díky tomuto proces můžeme redukovat počet chyb, které vznikají v důsledku běžných příčin: velký jako je úhrn srážek, směr větru z jiné oblasti, tzn. ne z oblasti footprintu, neturbulentní přenos, nestacionární podmínky v atmosféře, období se značnou divergencí a konvergencí vzdušných toků. U Eddy Covariance je důležité sledovat a detekovat období s nízkou turbulentností.

Kontrola kvality dat

Množství algoritmů, které jsou používány pro analýzu a filtraci dat (Carboeurope, FluxNet-Canada, AmeriFlux), má společné vlastnosti [46]:

- zjištění oblasti přípustných hodnot každé proměnné;
- smazání nebo označení dat, které nejsou v oblasti přípustných hodnot;
- označení dat, které byly získané v období srážek (u otevřeného analyzátoru);
- dickey–Fuller test a testy stacionarity;
- smazání nestacionárních intervalů;
- kontrola uzavření tepelné bilance;
- doplnění chybějících dat pomocí regrese, ostatních modelů atd.

Další kontrola kvality dat závisí na specifčnosti ekosystému.

Nejčastější příčiny mezer v datech:

- poškození u samotné aparatury;
- proudění větru pod svislým uhlem;
- srážkové události (důležité brát v úvahu limitace otevřených sensorů u EC);
- zásahy na lokalitě.

Během nocí se kvalita dat snižuje, a proto je důležité data řádně kontrolovat. Během této doby je atmosféra stabilní a důsledkem toho je, že zařízení sbírá data z větší oblasti.

Software EddyPro

Software počítá toky energie, impulzy, hodnoty oxidu uhličitého (CO₂), vodní páry (H₂O), metanu (CH₄) a ostatních malých plynových částic.

Pro zpracování dat EddyPro provádí dlouhou posloupnost operací včetně filtrování nezpracovaných dat, kalibrace atd. EddyPro poskytuje dvě cesty pro zpracování dat: Express Mode a Advanced Mode. V expresním režimu používá EddyPro předem určená nastavení, která jsou zavedena a přijata ve výzkumné společnosti. Express Mode je vhodný pro většinu nastavení EC. V pokročilém režimu je možnost nastavení dle vlastních požadavků a výzkumných problémů, ale volba této možnosti vyžaduje hlubší teoretické znalosti. [74] V této práci byl zvolen Express Mode.

EVATION

Pomocí tohoto softwaru je možné sledovat numerické hodnoty, mít data v grafické podobě a následně s nimi pracovat pomocí pokročilejších metod.

Tovi

Software je určený pro výpočet Eddy Covariance a meteorologických dat, které jsou předtím zpracované v EddyPro. Software spojuje analytické nástroje vyvinuté vědeckou komunitou. V softwaru jsou možnosti vizualizace, kontroly kvality dat, gap filling technik atd. [75]

K dispozici jsou následující gap filling techniky:

- The MDS Gap Fill (Marginal Distribution Sampling GF)
GF se provádí pomocí metody vyhledávací tabulky
- Biomet merge
Metoda umožňuje kombinovat několik proměnných, tzn. že na lokalitě probíhá několik současných měření jedné sledované veličiny.

5.4. Výsledky

5.4.1 Nepřímý odhad potenciální ET

V průzkumu [66] odhad hodnoty potenciální ET v zájmové lokalitě činí 592 mm/r, byla odhadnuta pomocí vztahu založeném na teplotě a potenciální radiální bilanci. Je známo, že ve sledované lokalitě hodnoty ET jsou větší než hodnoty P.

HYDROLOGICKÁ BILANCE

$$ET = P - \Delta S - Q - D, \text{ kde}$$

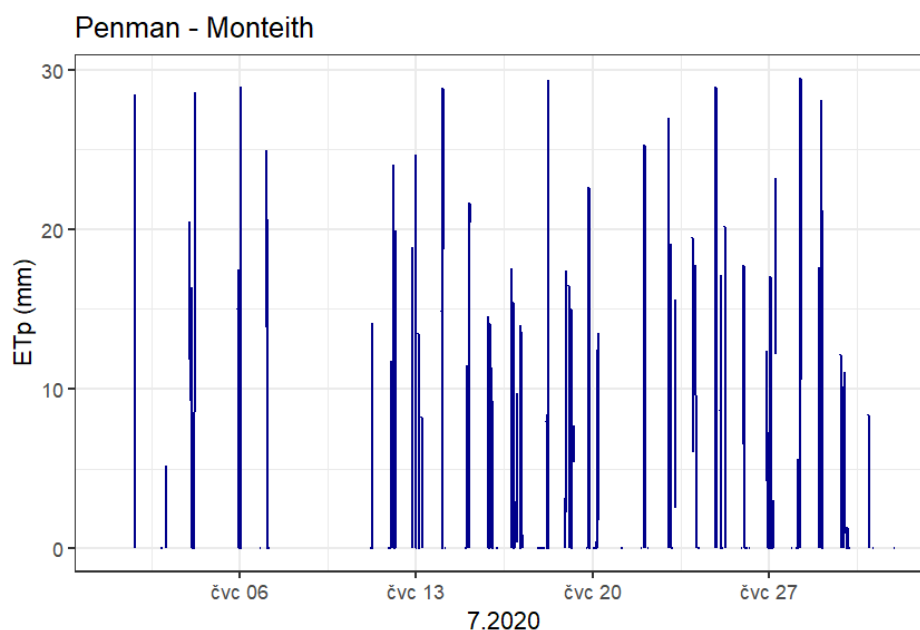
veličina P označuje srážky, ΔS – změnu množství vody v povodí, Q – odtok vody z povodí, D – doplňování podzemní vody.

Dle rovnice hydrologické bilance hodnota ET_p je v rozmezí 600–610 mm/r.

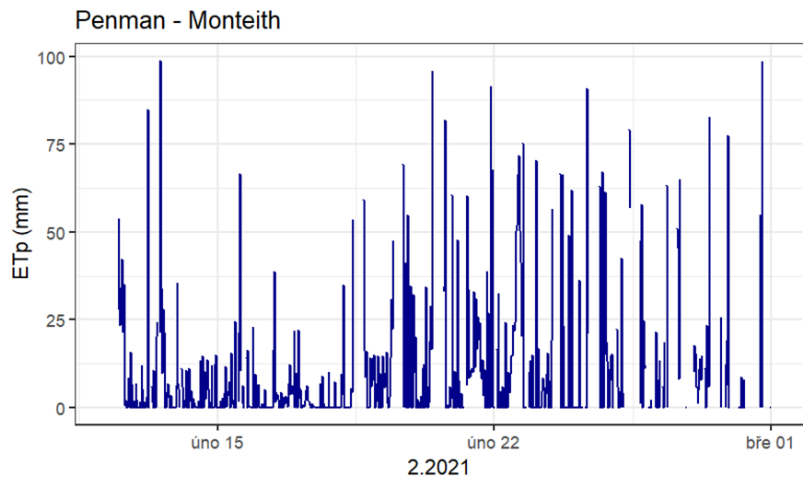
PENMAN - MONTEITH ROVNICE

Pro výpočet potenciální evapotranspirace pomocí Penman-Monteith rovnice potřebujeme standardní meteorologické záznamy: slunečné záření, teplotu vzduchu, vlhkost a rychlost větru. Rovnice Penman-Monteith byla vysvětlena v kapitole 3.3.5.1.

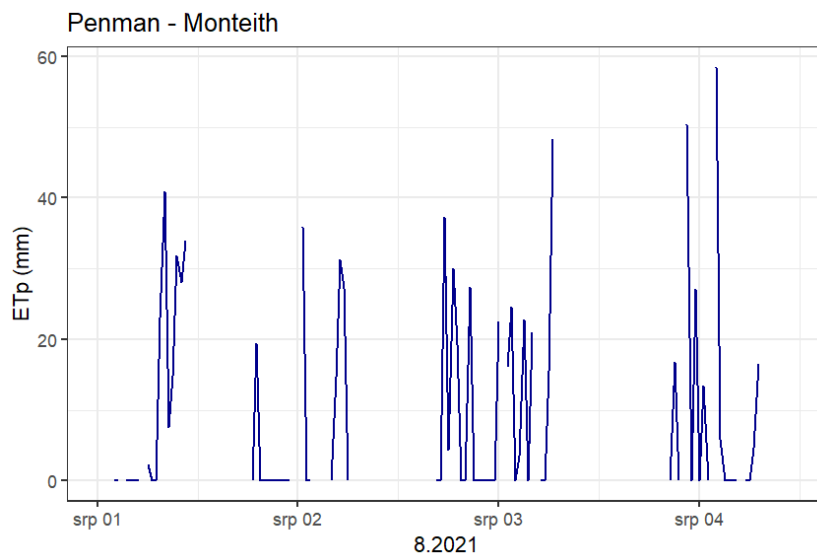
Eddy Covariance



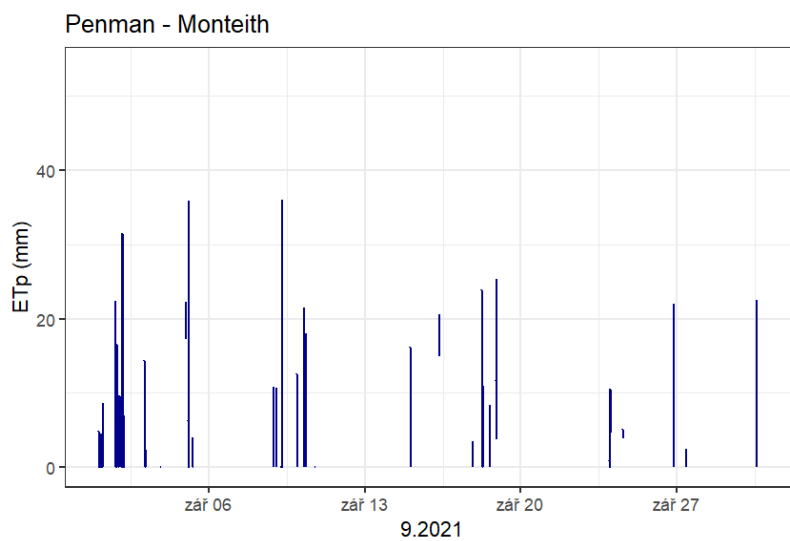
Graf 1: červenec 2020, odhad ET_p pomocí Penman-Monteith metody u Eddy Covariance



Graf 2: únor 2021, odhad ETp pomoci Penman-Monteith metody u Eddy Covariance

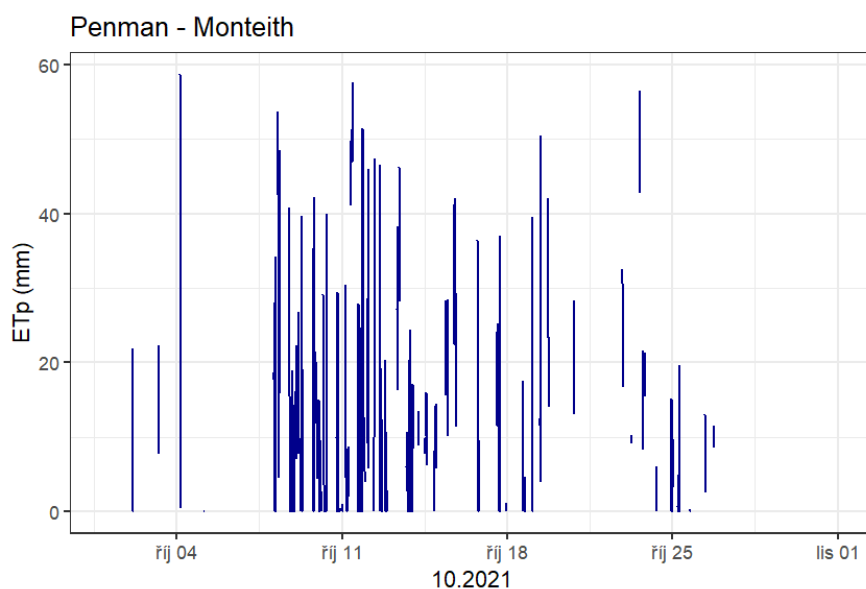


Graf 3: srpen 2021, odhad ETp pomoci Penman-Monteith metody u Eddy Covariance

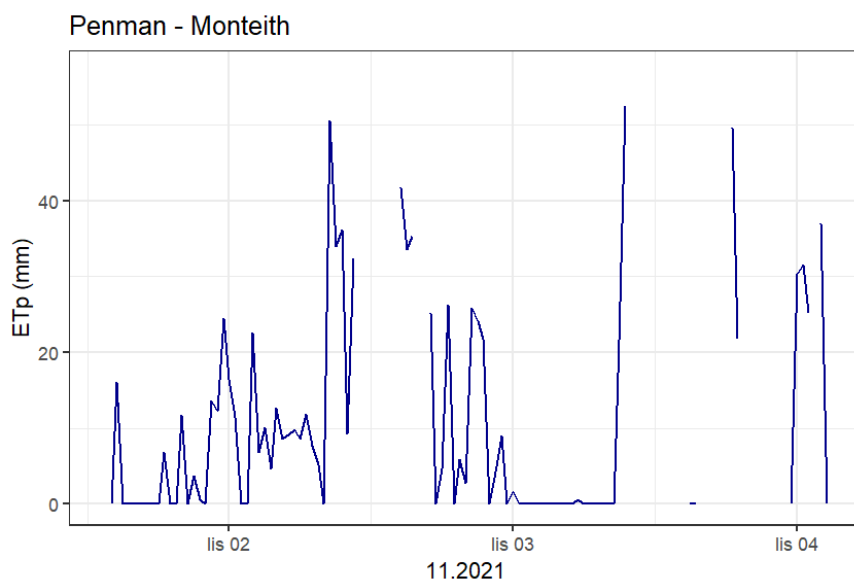


Graf 4: září 2021, odhad ETp pomoci Penman-Monteith metody u Eddy Covariance

V červenci 2020 byl výpar stabilní, nebyly pozorované extrémní hodnoty. Během srpna 2021 docházelo k větším výkyvům ve srovnání s ostatními měsíci. Krom toho, značná část dat chybí kvůli nedostatkům měření u Eddy Covariance systému a zanášením filtru.



Graf 5: říjen 2021, odhad ETp pomocí Penman-Monteith metody u Eddy Covariance

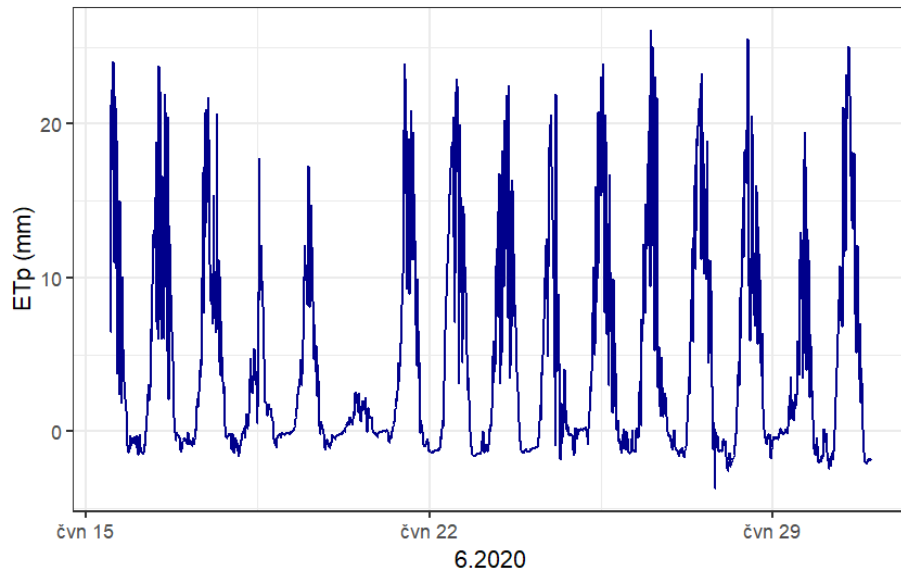


Graf 6: listopad 2021, odhad ETp pomocí Penman-Monteith metody u Eddy Covariance

Oproti srpnu (Graf č.3) a září (Graf č. 4) v říjnu (Graf č. 5) evapotranspirace probíhala intenzivně převážně v půlce měsíce, během kterých se vyskytovaly i extrémní hodnoty. V listopadu 2021 (Graf č. 6) nabýval výpar menších hodnot.

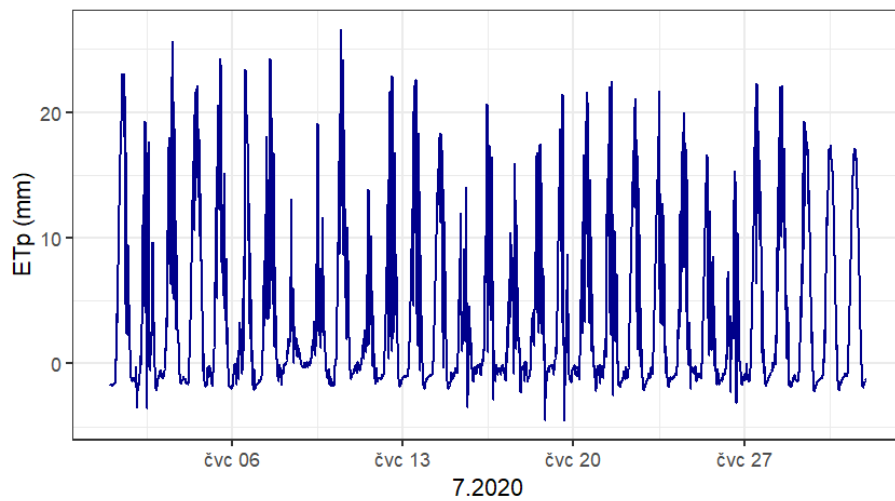
Scintilometr

Penman - Monteith

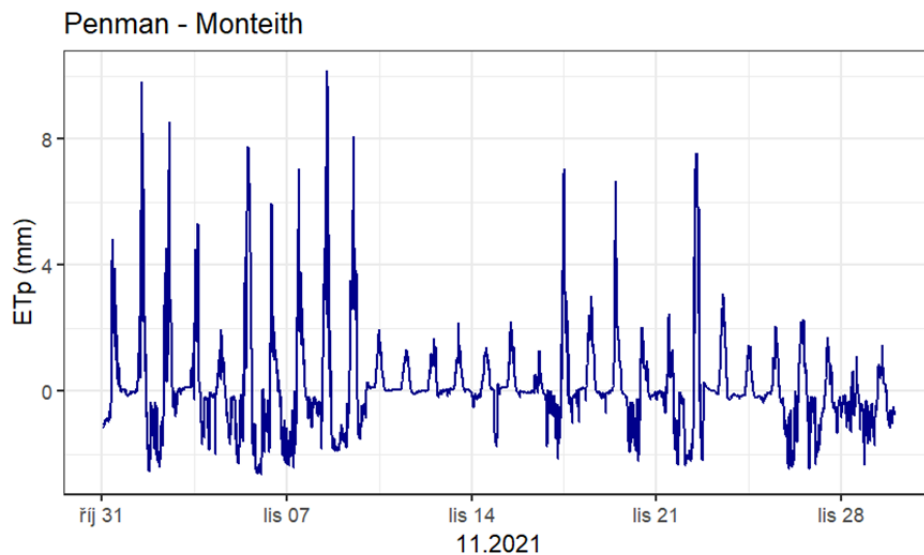


Graf 7: červen 2020, odhad ETp pomoci Penman-Monteith metody u Scintilometru

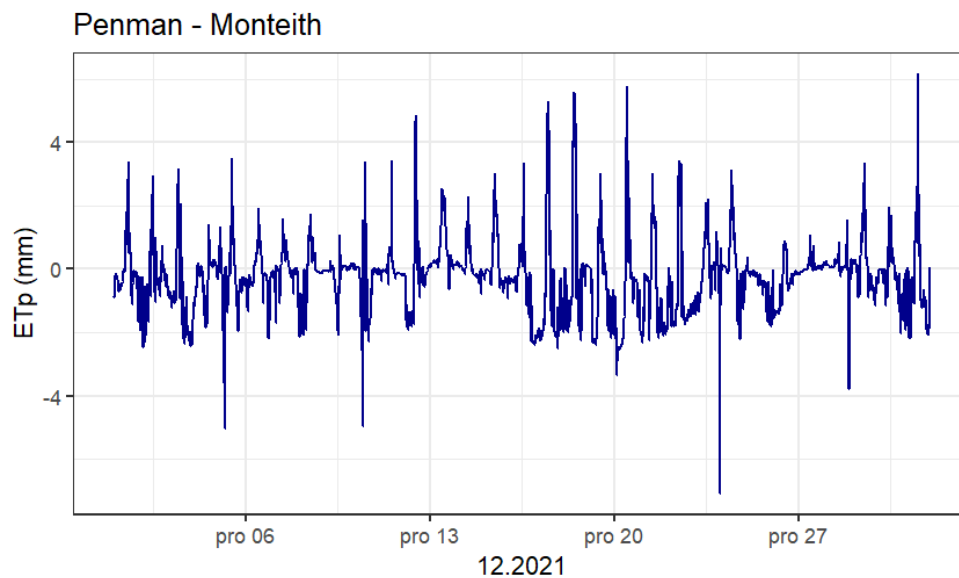
Penman - Monteith



Graf 8: červenec 2020, odhad ETp pomoci Penman-Monteith metody u Scintilometru

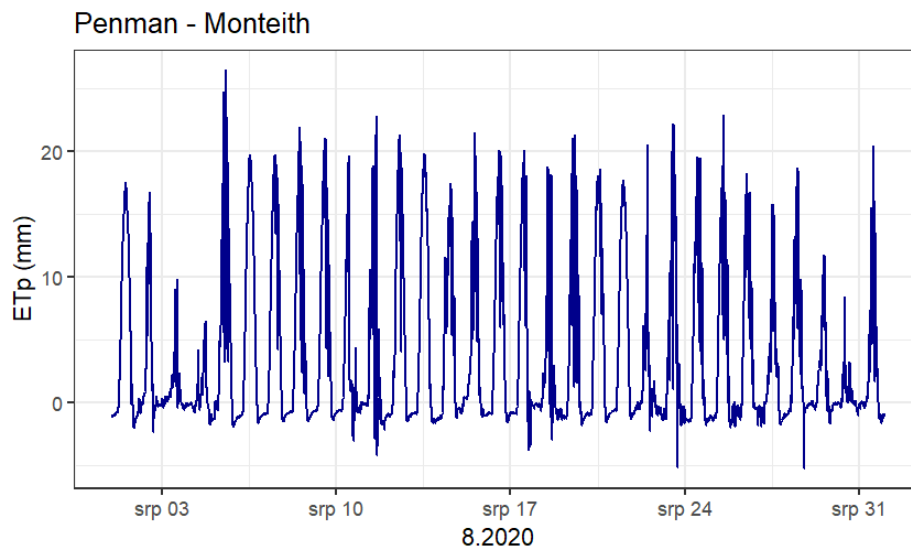


Graf 9: listopad 2021, odhad ETp pomoci Penman-Monteith metody u Scintilometru



Graf 10: prosinec 2021, odhad ETp pomoci Penman-Monteith metody u Scintilometru

U scintilometru se mezery v datech nevyskytují, hodnoty výparu nemají velké výkyvy. Občas je vidět nízké hodnoty výparu během několika dnů. To může být způsobeno intenzivním deštěm nebo jinými srážkami.



Graf 11: srpen 2020, odhad ETp pomocí Penman-Monteith metody u Scintilometru

HARGRAEVESOVÁ ROVNICE

Hargreavesova rovnice (Hargreaves a Samani, 1985) je modelem evapotranspirace, který vyžaduje pouze několik parametrů: mimozemské sluneční záření, minimální, maximální a střední teplotu. [76] Rovnice vypadá takto:

$$ET_o = 0.0022 * Ra * \Delta T^{0.5} * (T + 17.8),$$

kde konkrétní veličiny znamenají:

Ra = střední mimozemské slunečné záření [mm/den], které je funkcí zeměpisné šířky;

$\Delta T^{0.5}$ = teplotní rozdíl [oC];

T = průměrná teplota [oC]

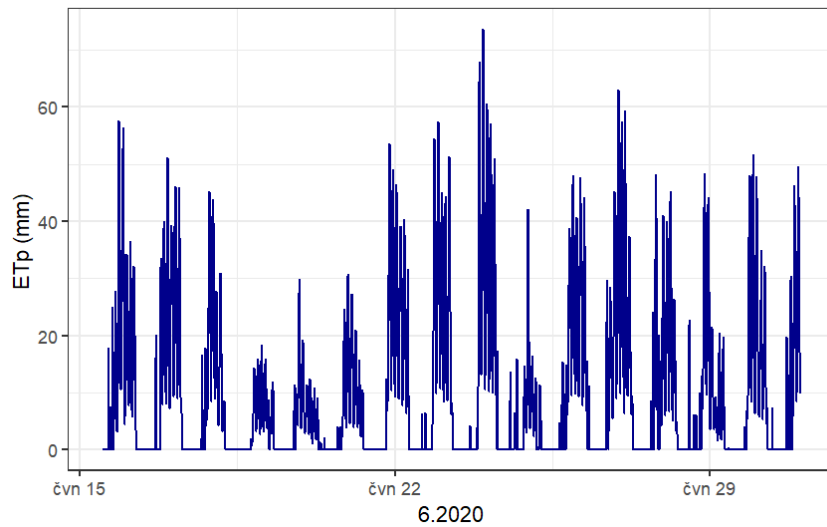
Hargreavesova metoda je doporučena FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) jako alternativní metodou pro odhad potenciální evapotranspirace v situaci, kdy nejsou k dispozici dostatečné meteorologické údaje pro Penman-Monteithovu metodu. Hargreavesova rovnice má tendenci podhodnocovat ETo za podmínek silného větru ($u_2 > 3$ m/s) a nadhodnocovat ETo za podmínek vysoké relativní vlhkosti. [76]

Postup výpočtu [76]:

1. potřebujeme převést zeměpisnou šířku na radiány a datum na juliánské dny;
2. pro odhad mimozemského záření musíme nejprve vypočítat sluneční deklinaci, hodinový úhel západu slunce a inverzní relativní vzdálenost Země-Slunce;
3. v posledním kroku můžeme odhadnout ETo za předpokladu minimální teploty, maximální teploty a střední teploty.

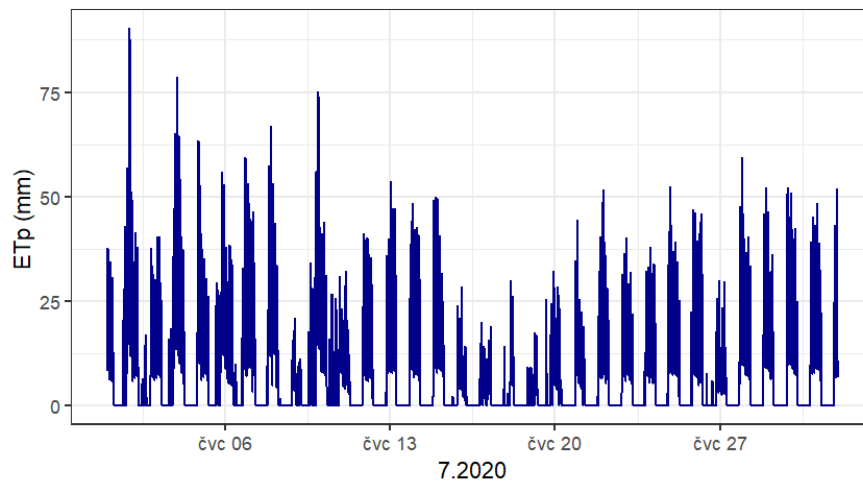
Scintilometr

Hargreaves



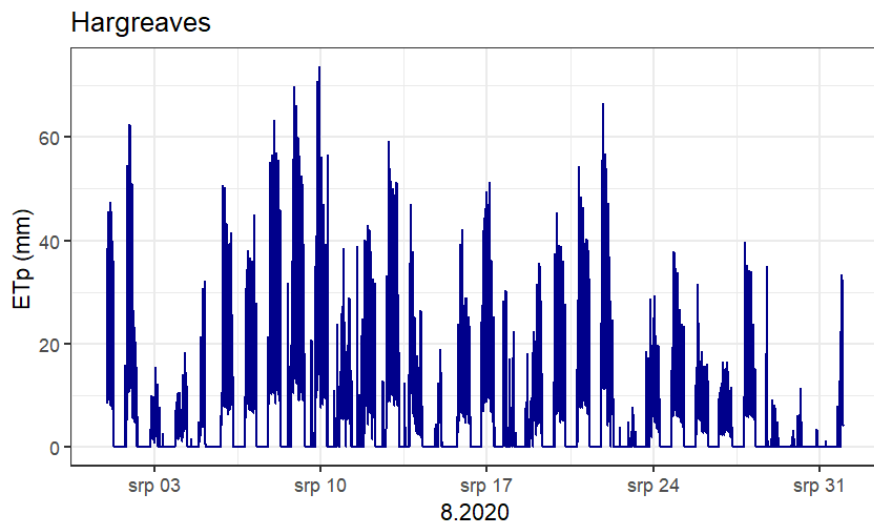
Graf 12: červen 2020, odhad ETp pomoci Hargreaves metody u Scintilometru

Hargreaves

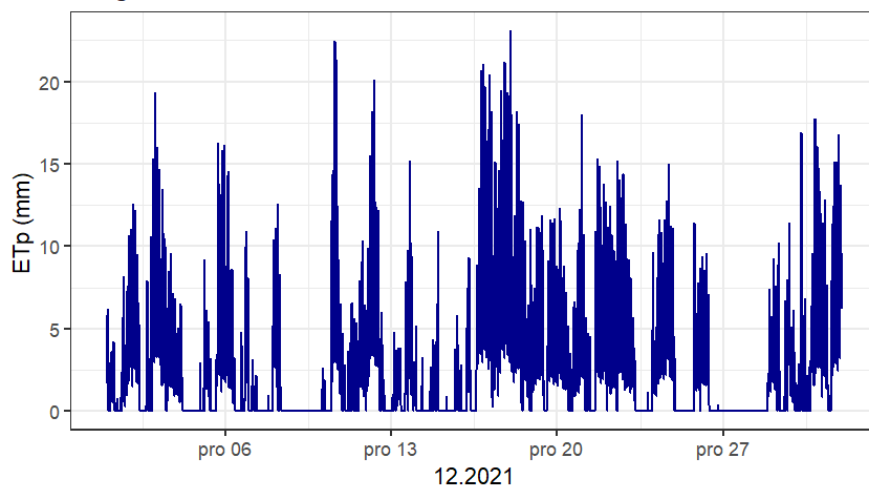


Graf 13: červenec 2020, odhad ETp pomoci Hargreaves metody u Scintilometru

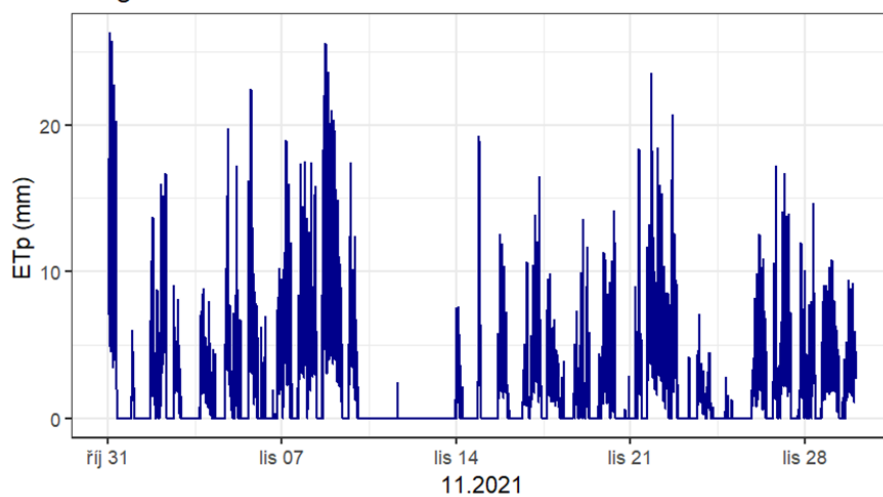
Ve srovnání s Penman – Monteith metodou evapotranspirace, která byla vypočtena pomocí Hargreaves metody, vykazuje Hargreavesova rovnice větší hodnoty, ale průběh výparu podstatně nezměnil. To může být způsobeno menším množstvím dat, které potřebujeme k vypočtu Hargreavesovy rovnice. Tím pádem je Hargreavesova rovnice vhodnější pro aplikace v oblastech, kde jsou k dispozici pouze omezená data. Nicméně, přesnost Hargreavesovy rovnice může být ovlivněna nejen kvalitou dat, ale také klimatickými podmínkami, jako jsou změny srážek a teploty, které mohou ovlivnit výpar.



Graf 14: srpen 2020, odhad ETp pomoci Hargreaves metody u Scintilometru Hargreaves



Graf 15: prosinec 2021, odhad ETp pomoci Hargreaves metody u Scintilometru Hargreaves



Graf 16: listopad 2021, odhad ETp pomoci Hargreaves metody u Scintilometru

THORNTWAITOVÁ ROVNICE

Thornthwaitova metoda je založena na empirickém přístupu odhadu potenciální evapotranspirace funkcí průměrné měsíční teploty. Evapotranspirace je původně určena k výpočtu na měsíční bázi, ale je možné odhadnout i denní hodnoty. [77]

Rovnice má následující tvar v případě $0 \leq T \leq 26$:

$$ETP = 16 * \frac{N}{360} * \left(\frac{10 * T}{I}\right)^{\alpha}$$

v případě $T > 26$:

$$ETP = \frac{N}{360} * (-415.85 + 32.24T - 0.43 * T^2)$$

kde:

N = trvání slunečního světla v hodinách, měnící se podle ročního období a zeměpisné šířky;

T = průměrná denní teplota vzduchu [°C];

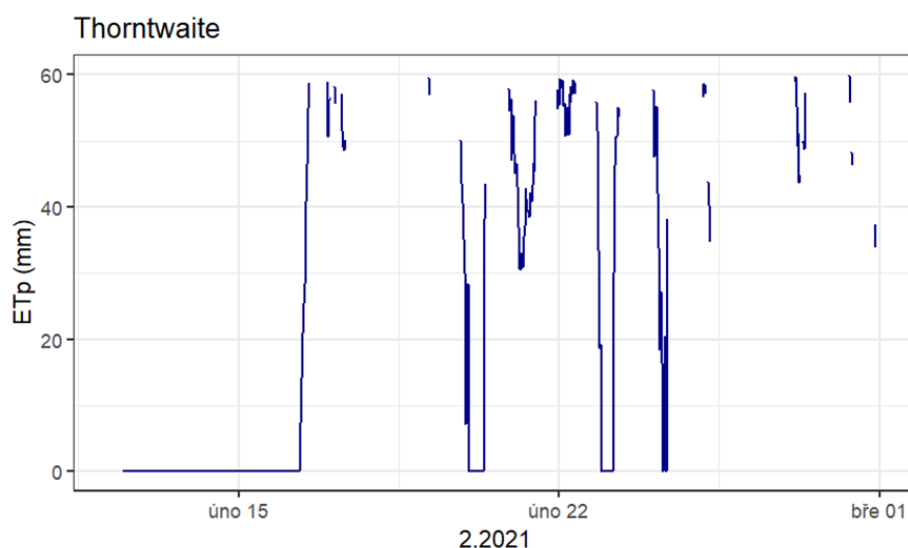
I = tepelný index

$$I = \sum_{k=1}^{12} (0.2 * T_k)^{1.514}$$

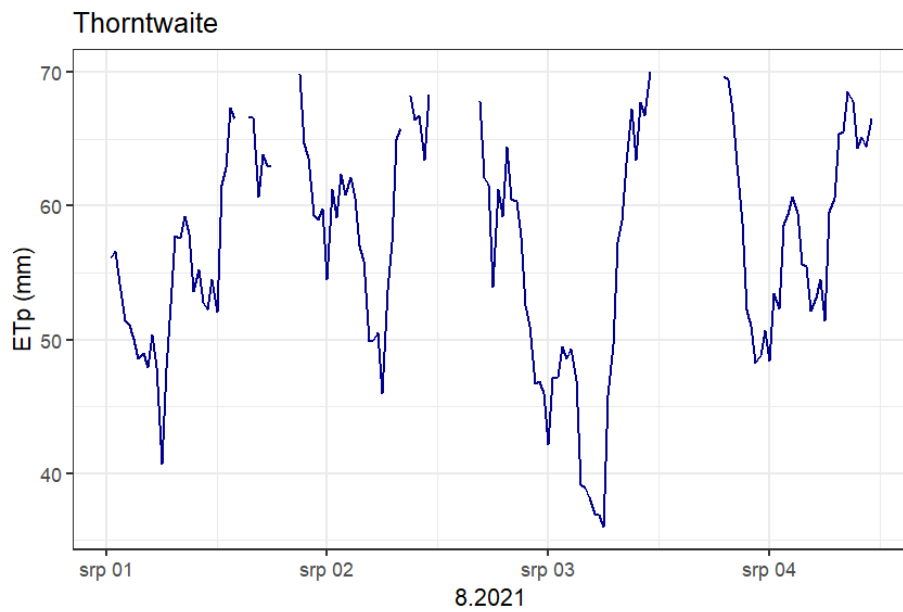
α lze spočítat následujícím způsobem:

$$\alpha = (6.75 * 10^{-7} * I^3) - (7.71 * 10^{-5} * I^2) + (0.01792 * I) + (0.49239)$$

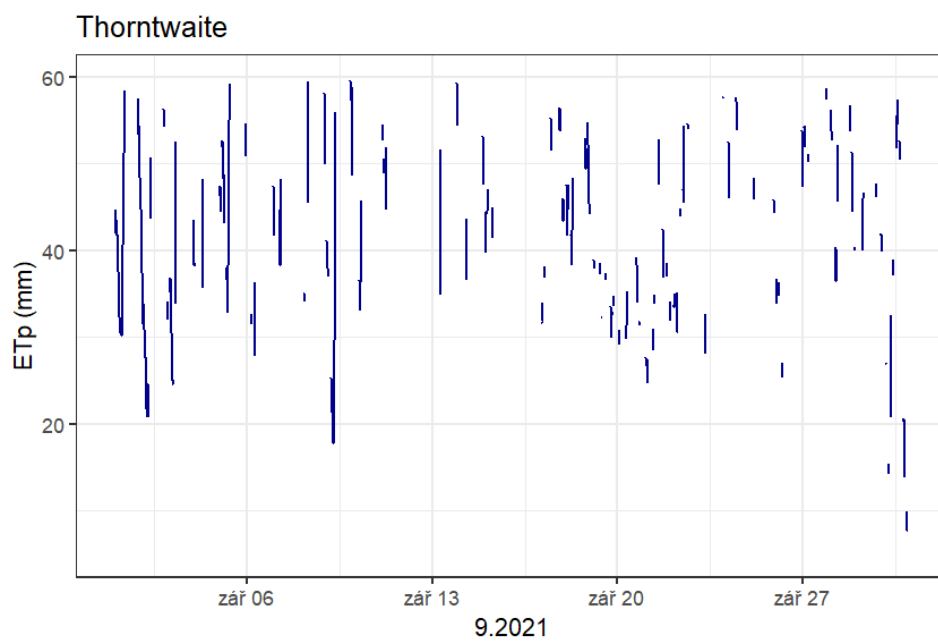
Eddy Covariance



Graf 17: únor 2021, odhad ETP pomocí Thorthwaite metody u Eddy Covariance

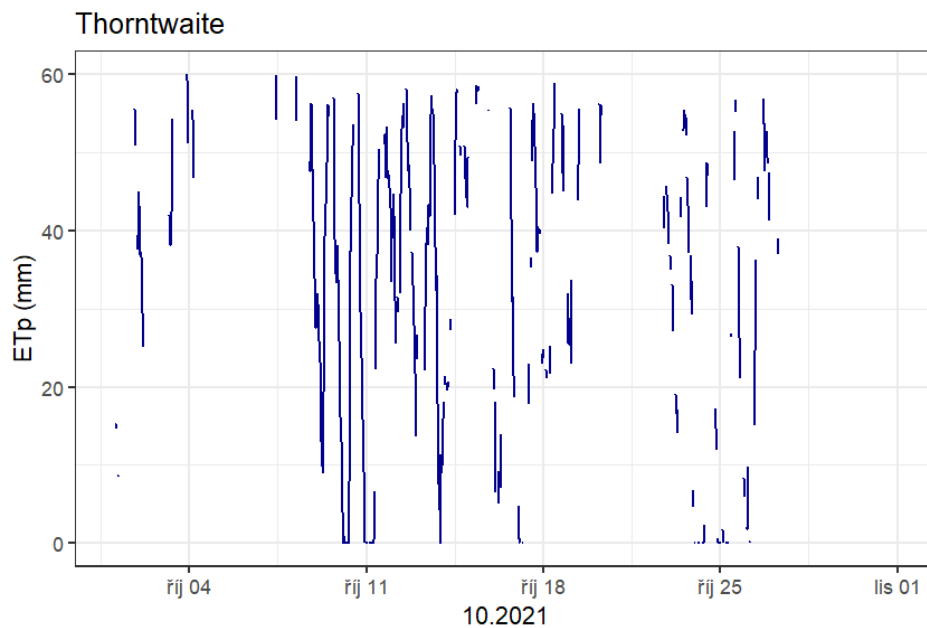


Graf 18: srpen 2021, odhad ETp pomoci Thorthwaite metody u Eddy Covariance

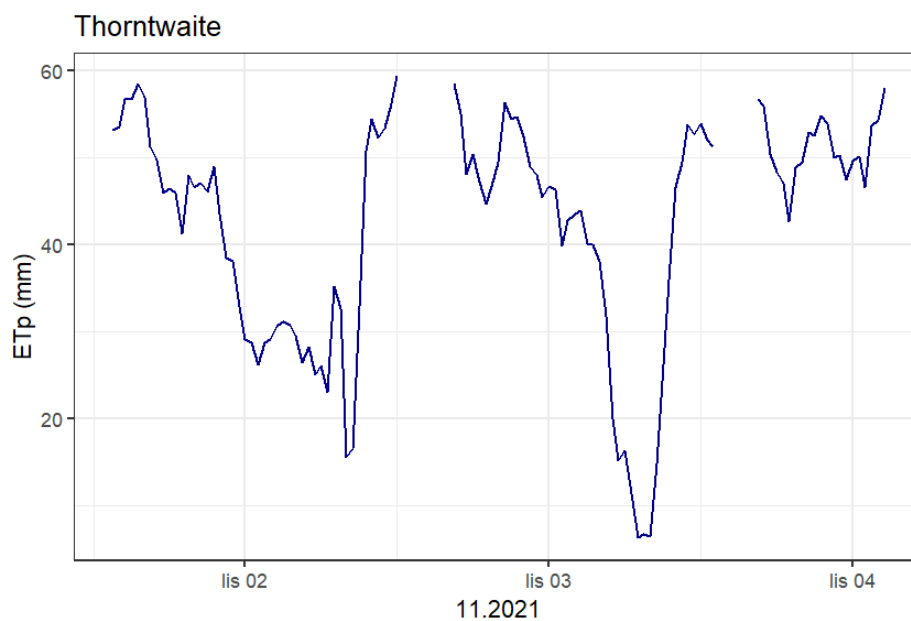


Graf 19: září 2021, odhad ETp pomoci Thorthwaite metody u Eddy Covariance

Výpar vypočtený pomoci Thorntwaite metody ukazuje nejvyšší hodnoty. Na začátku srpna roku 2021 (Graf č. 18) evapotranspirace dosahovala až 70 mm. V září 2021 (Graf č. 19) kolísala v rozmezí 20–60 mm.



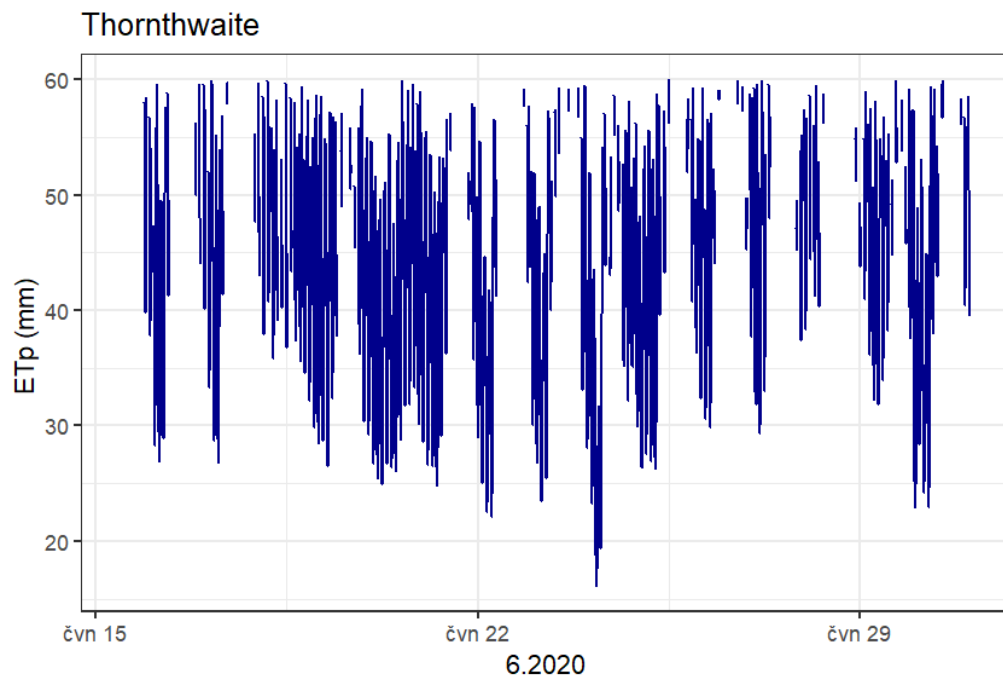
Graf 20: říjen 2021, odhad ETp pomocí Thorthwaite metody u Eddy Covariance



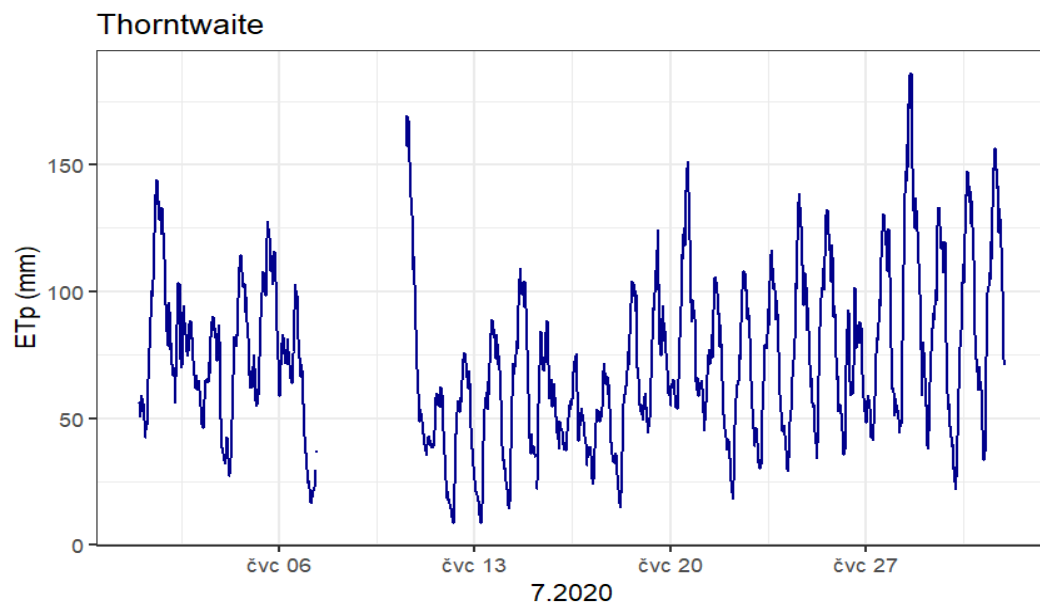
Graf 21: listopad 2021, odhad ETp pomocí Thorthwaite metody u Eddy Covariance

Výpar odhadnutý pomocí metody Thorthwaite má největší hodnoty ve srovnání s ostatními metodami. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že metoda Thornthwaite vyžaduje méně dat pro výpočet než jiné metody. Kvůli této jednoduchosti výpočtu, metoda Thornthwaite nadhodnocuje výpar. V porovnání s odhadem pomocí Penman-Monteith rovnice, která vyžaduje více proměnných pro výpočet, existuje významný rozdíl v hodnotách potenciální evapotranspirace.

Scintilometr



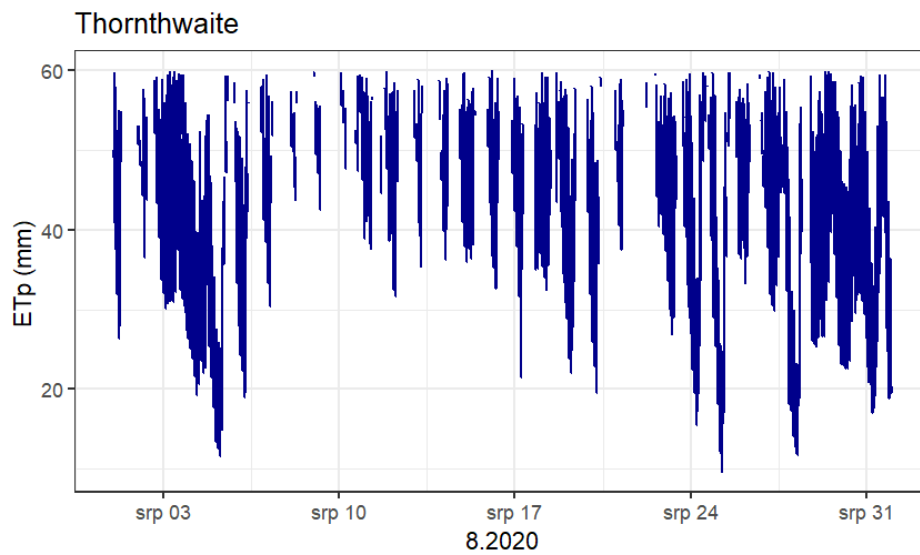
Graf 22: červen 2020, odhad ETp pomoci Thornthwaite metody u Scintilometru



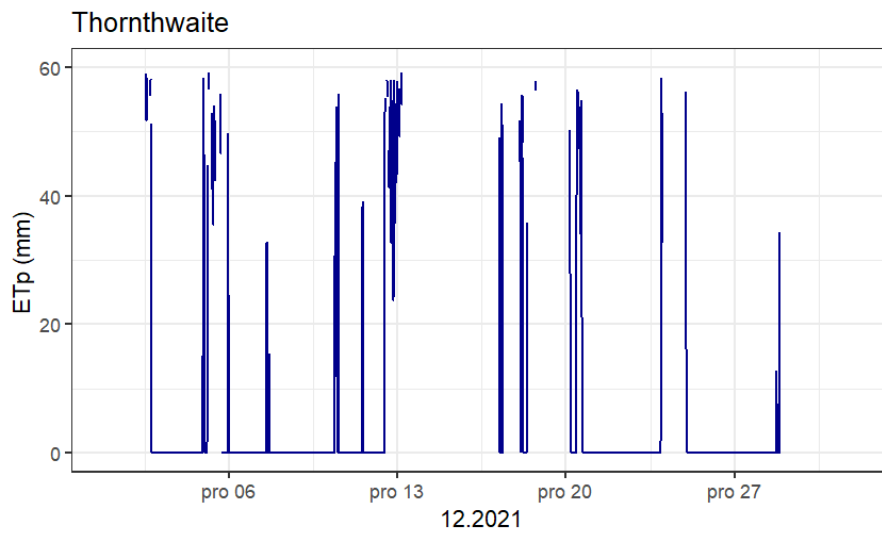
Graf 23: červenec 2020, odhad ETp pomoci Thornthwaite metody u Scintilometru

V červnu 2020 (Graf č.22) hodnoty potenciální evapotranspirace byly nejvyšší, ale vykazovaly značné kolísání ve srovnání s ostatními měsíci.

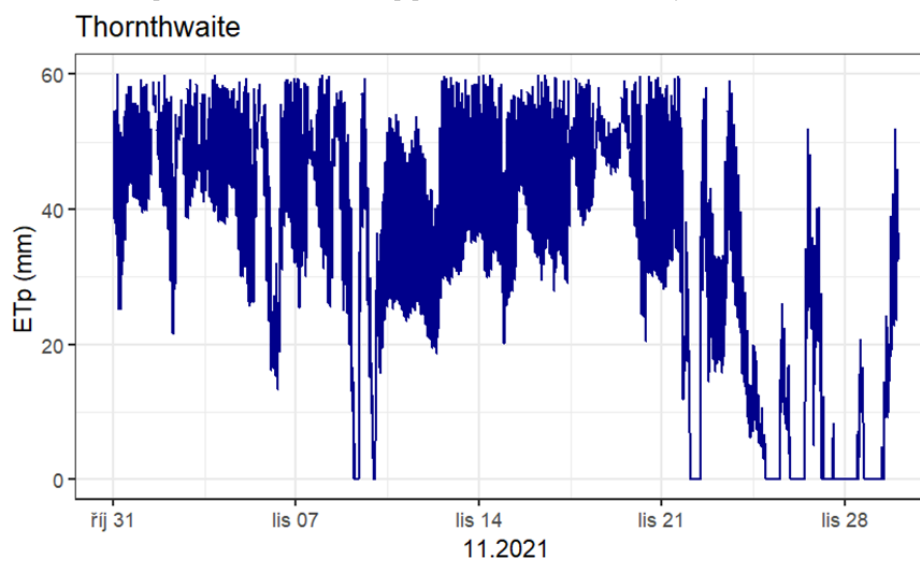
Občas v datové sadě vyskytovali extrémně velké hodnoty, které byli vyfiltrovány, protože značně zkreslovali výsledek. U Thornthwaite metody extrémně velkých hodnot bylo co nejvíce, a proto vyskytují mezery v časových řadách i u scintilometru, zatímco u časových řad aktuální evapotranspirace nejsou mezery a extrémně velké hodnoty výparu.



Graf 24: srpen 2020, odhad ETp pomoci Thornthwaite metody u Scintilometru



Graf 25: prosinec 2021, odhad ETp pomoci Thornthwaite metody u Scintilometru



Graf 26: listopad 2021, odhad ETp pomoci Thornthwaite metody u Scintilometru

5.4.2 Přímé metody

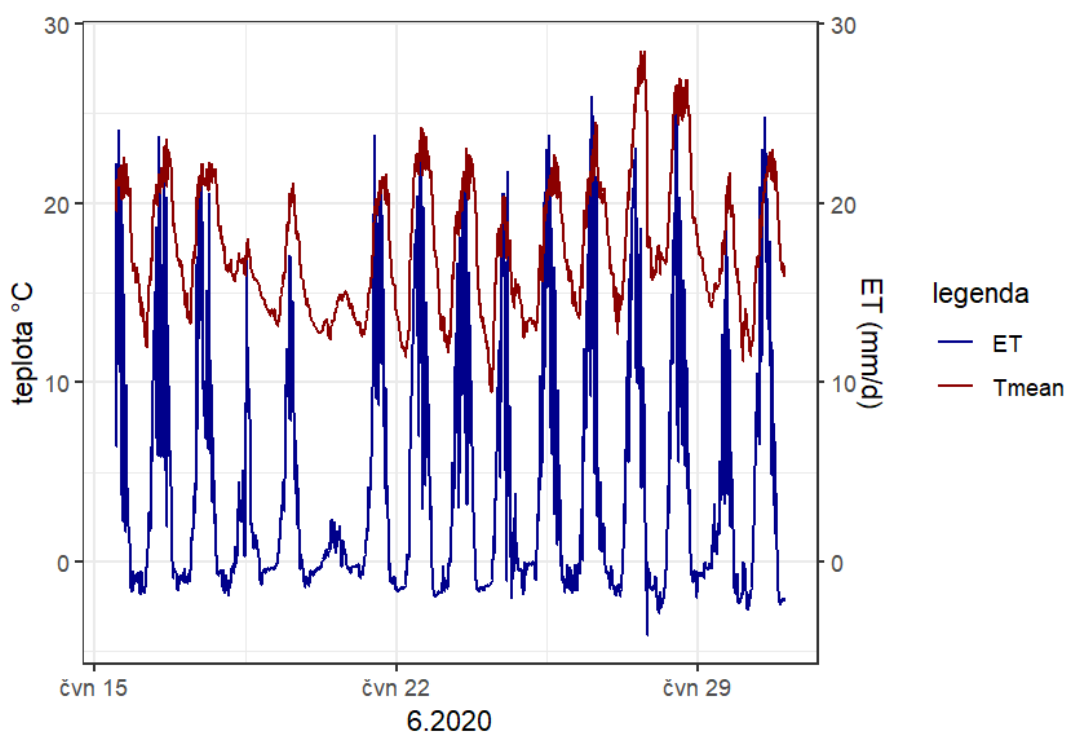
V následující kapitole jsou znázorněny výsledky měření pomocí Eddy Covariance věže a scintilometru. U měření Eddy Covariance chybělo v některých měsících velké množství dat, a proto je vhodné použití gap filling technik, např. pomocí metody MDS Gap Fill (Marginal Distribution Sampling Technique).

Marginální rozdělení představuje rozdělení pravděpodobnosti proměnných, které jsou v určité podmnožině, aniž by byla náhodná veličina ovlivněná ostatními proměnnými. To umožňuje reprezentovat pravděpodobnosti různých hodnot proměnných v podmnožině bez zadání dalších hodnot proměnných. Marginální rozdělení je opakem podmíněného rozdělení, v němž jsou pravděpodobnosti zcela závislé na jiných hodnotách proměnných. [78]

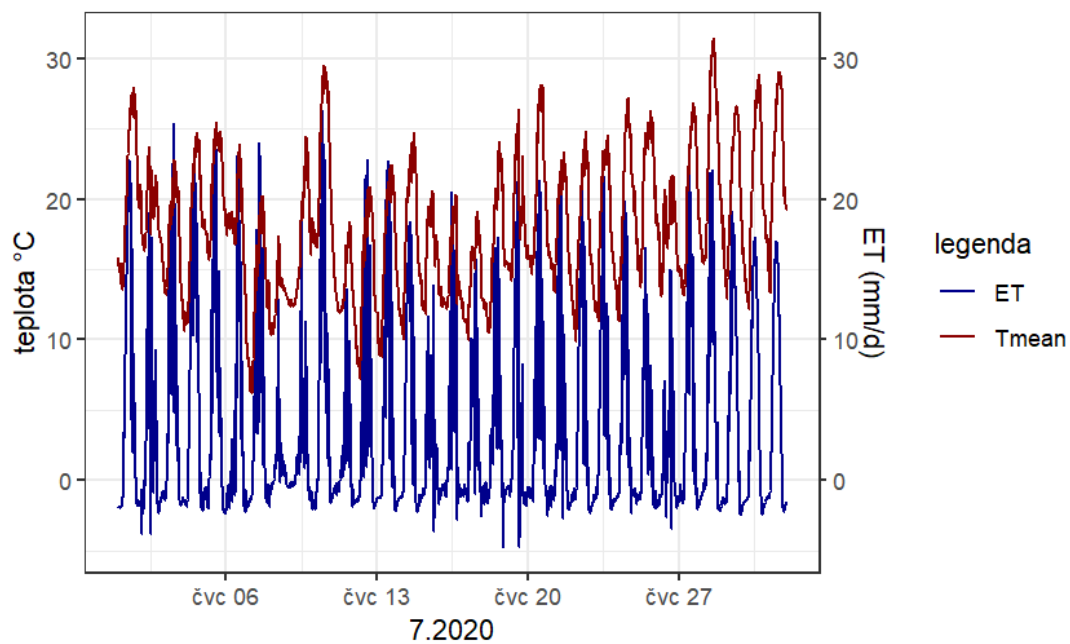
V algoritmu MDS se používá metoda vyhledávací tabulky. Chybějící data ve vyhledávací tabulce bývají nahrazeny průměrem hodnot, které se vyskytovaly za stejných meteorologických podmínek v určitém časovém intervalu. Pokud nejde vyplnit mezeru i za pomoci vyhledávací tabulky, data budou nahrazena skrze průměrné hodnoty sousedních dnů pro stejný časový úsek. [79]

Následující grafy ukazují průběh evapotranspirace vybraných měsíců v roce 2020 a 2021.

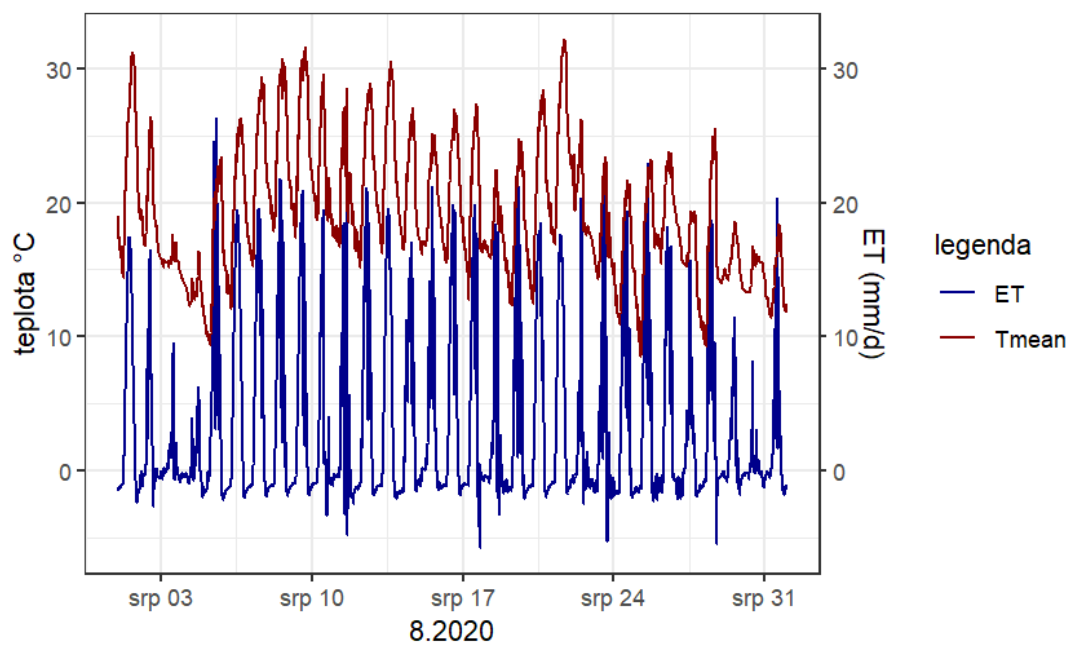
Scintilometr



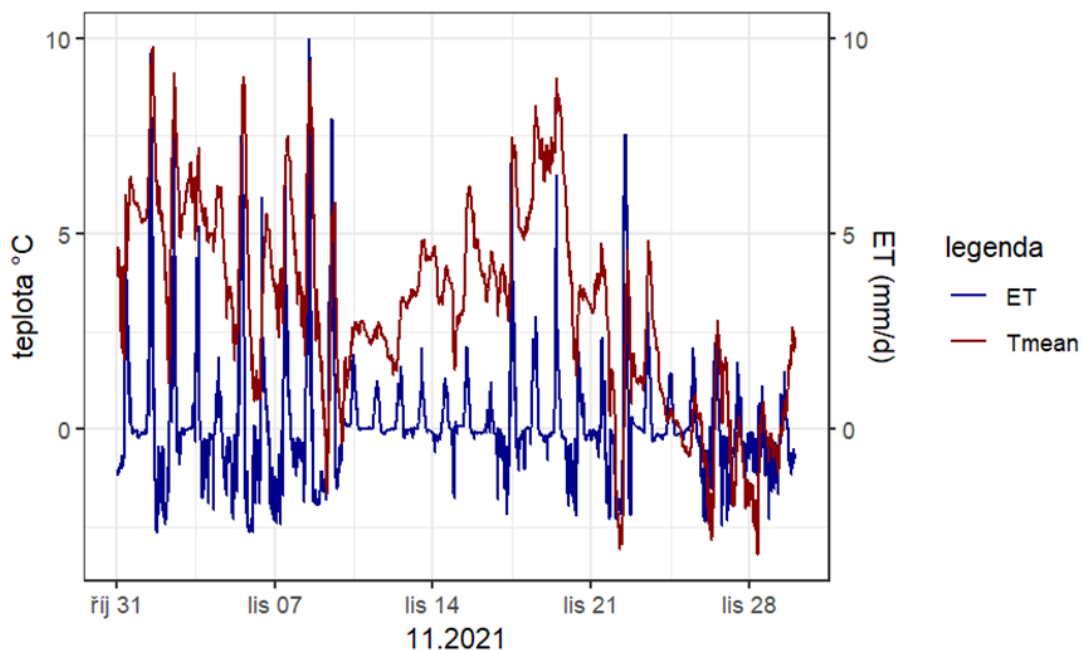
Graf 27: červen 2020, ET a střední teploty u scintilometru



Graf 28: červenec 2020, ET a střední teploty u scintilometru

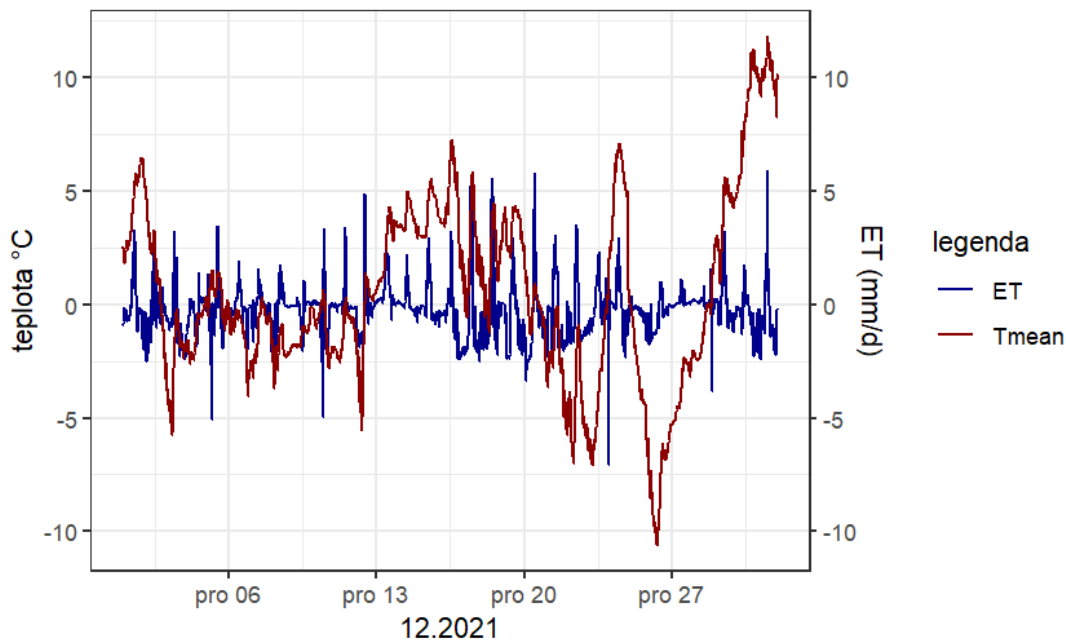


Graf 29: srpen 2020, ET a střední teploty u scintilometru



Graf 30: listopad 2021, ET a střední teploty u scintilometru

Z grafů č. 27, 28,29 je patrně, že aktuální evapotranspirace je ovlivněná kolísáním teplot, primárně v letních měsících. Výpar v letních měsících je značně ovlivněn transpirací, protože při vyšších teplotách se rostliny snaží prostřednictvím dýchání ochlazovat a uvolňují více vody.



Graf 31: prosinec 2020, ET a střední teploty u scintilometru

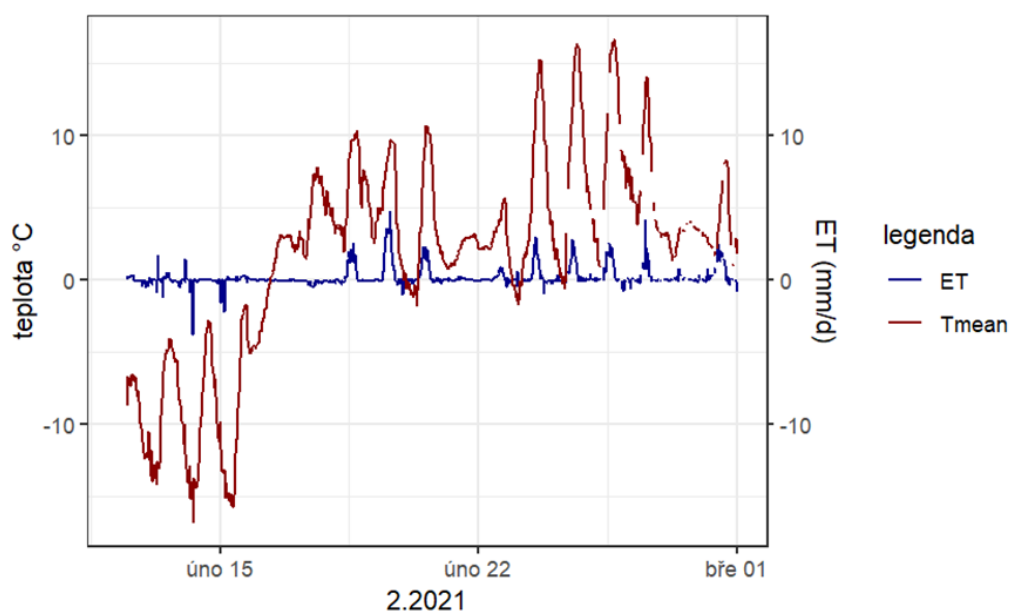
Velkou výhodou scintilometru je skutečnost, že se v datech nevyskytují mezery a zařízení není příliš citlivé k turbulenci a k stabilitě atmosféry. Přesto je důležité data

řádně kontrolovat a provádět správnou statistickou analýzu, jelikož je scintilometr značně limitován při velké oblačnosti.

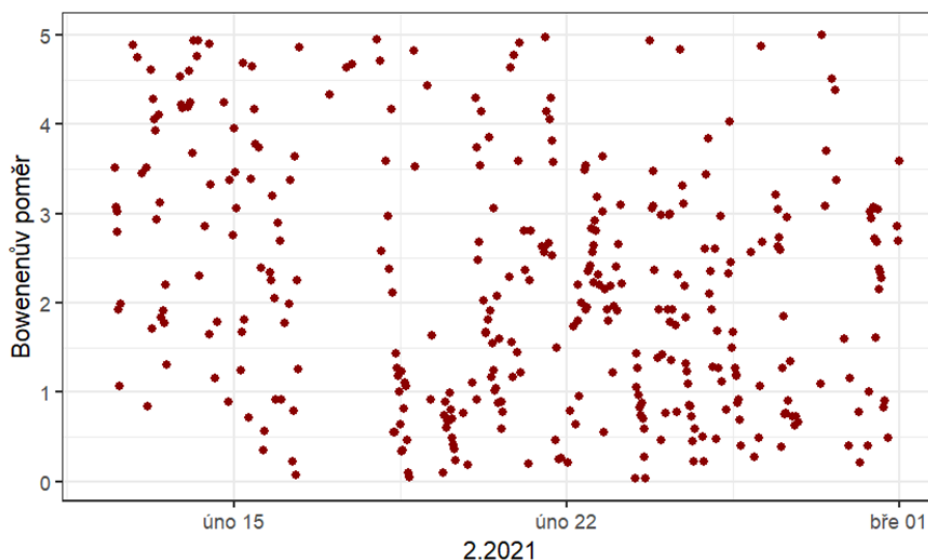
Eddy Covariance

V červnu a srpnu roku 2020 se vyskytují velké mezery. Z toho důvodu byl použit Gap filling (viz kapitola 5.4.3 Gap Filling).

Leden 2021



Graf 32: únor 2021, ET a střední teploty u Eddy Covariance

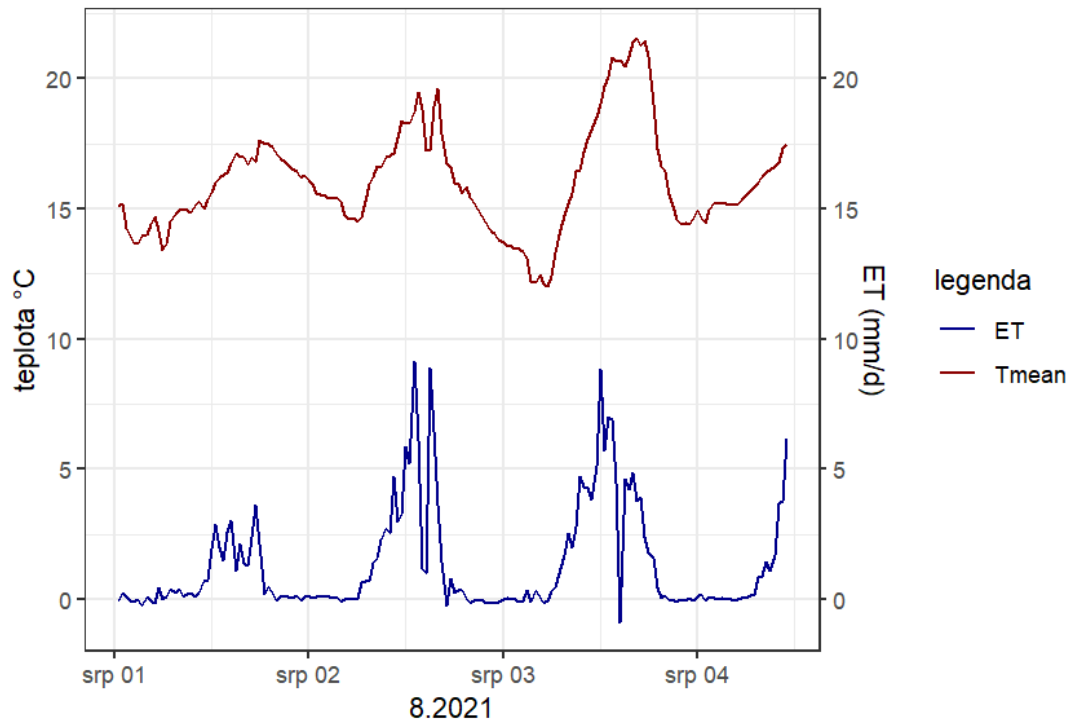


Graf 33: únor 2021, Bowenův poměr u Eddy Covariance

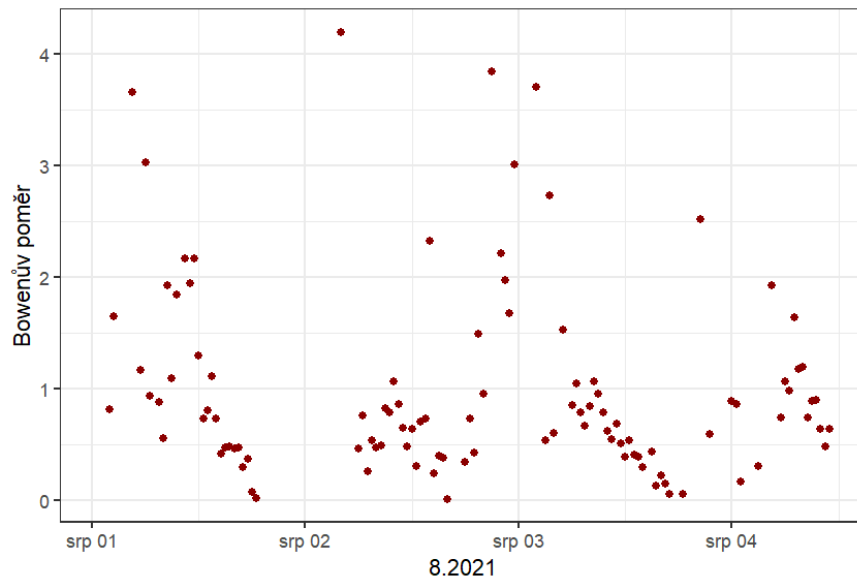
V únoru 2021 byla evapotranspirace stabilní i když teploty měly značné výkyvy. Bowenův poměr má až moc velké hodnoty u všech sledovaných měsíců. Pro zájmovou

lokalitu hodnoty Bowenova poměru by neměli přesahovat 1. [80] V případě $\beta > 1$ můžeme říci, že je v lokalitě nedostatek vody a dochází k ohřevu atmosféry. [80]

Srpen 2021

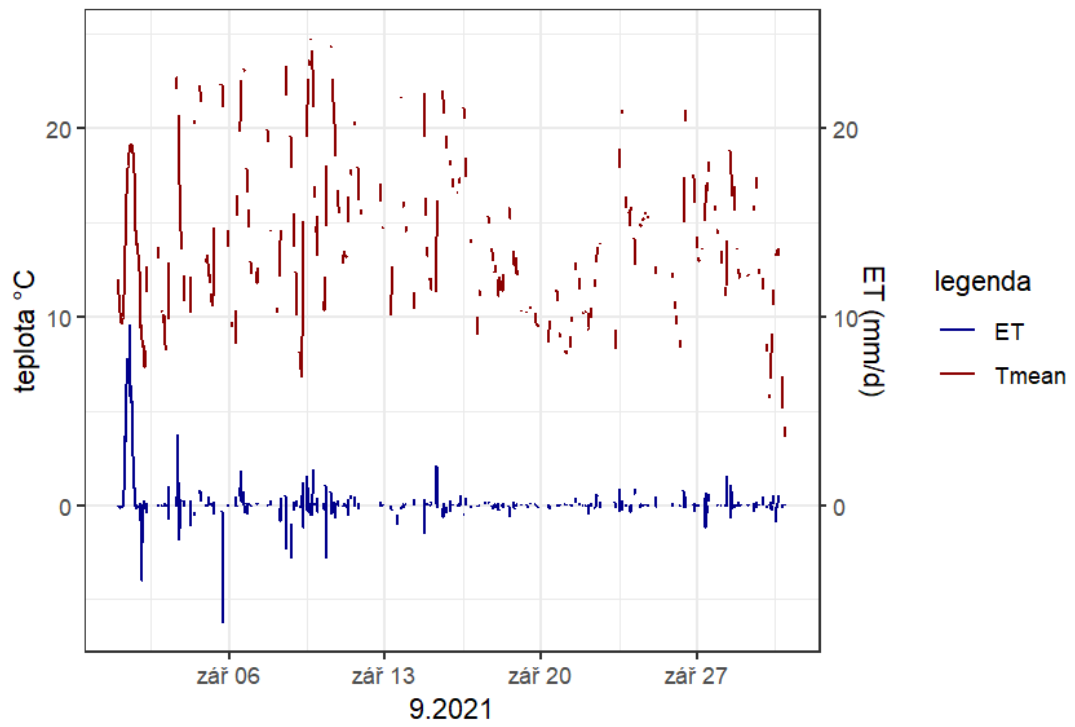


Graf 34: srpen 2021, ET a střední teploty u Eddy Covariance

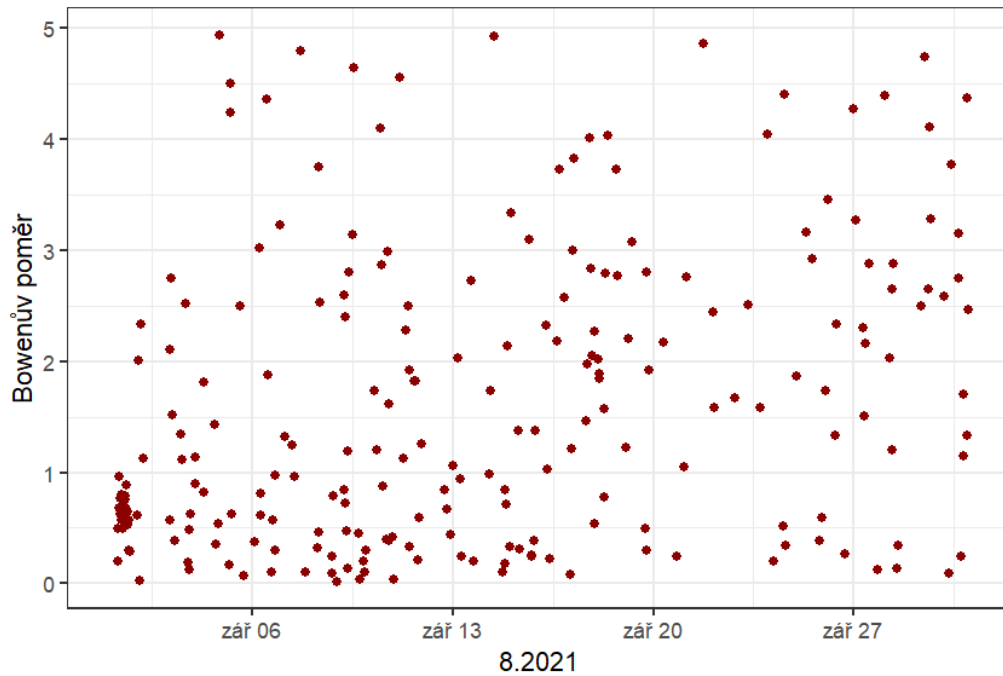


Graf 35: srpen 2021, Bowenův poměr u Eddy Covariance

Září 2021

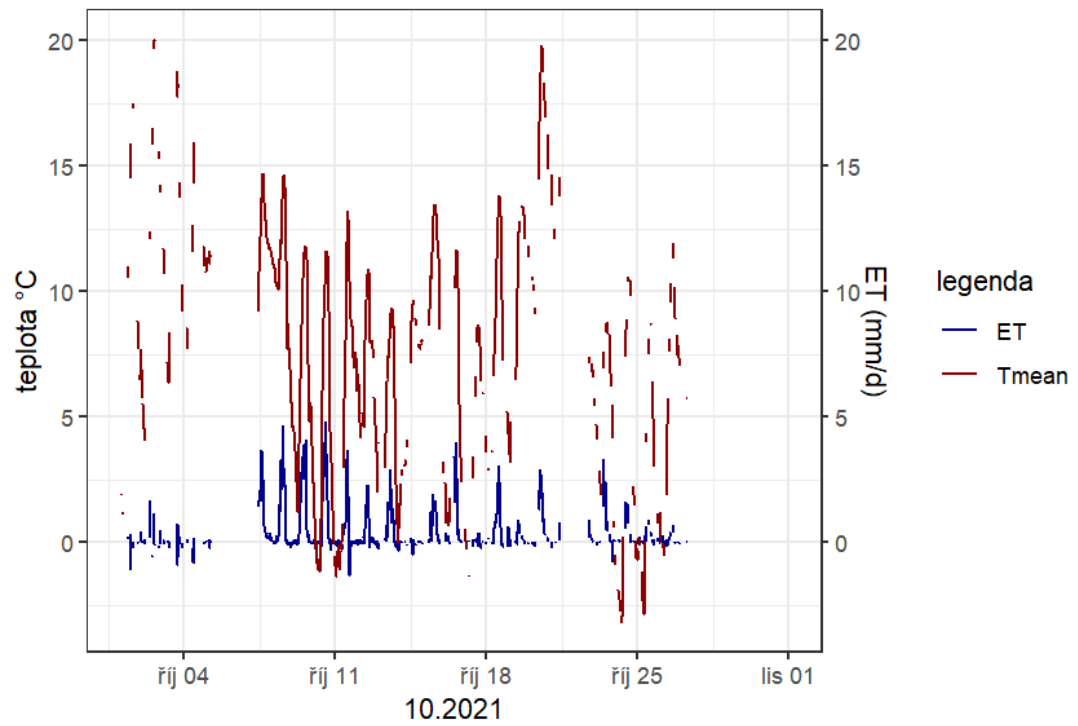


Graf 36: září 2021, ET a střední teploty u Eddy Covariance

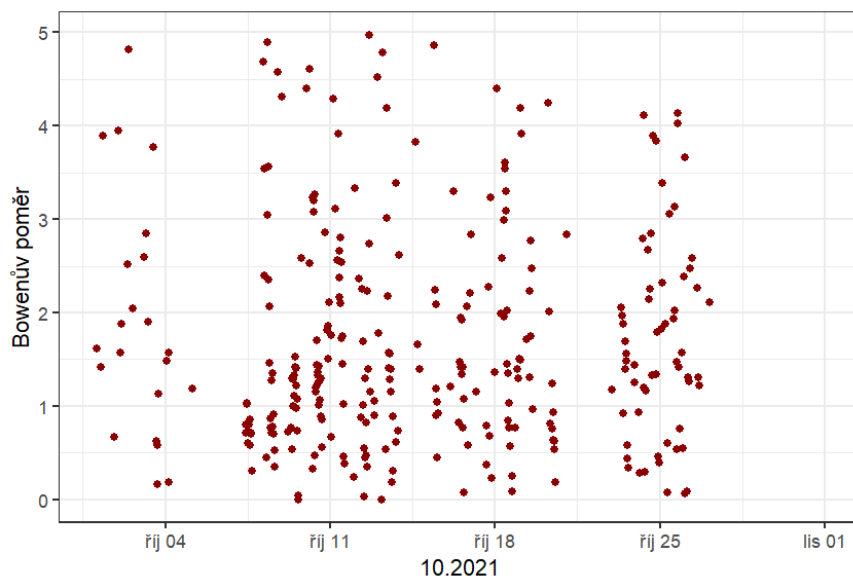


Graf 37: září 2021, Bowenův poměr u Eddy Covariance

Říjen 2021

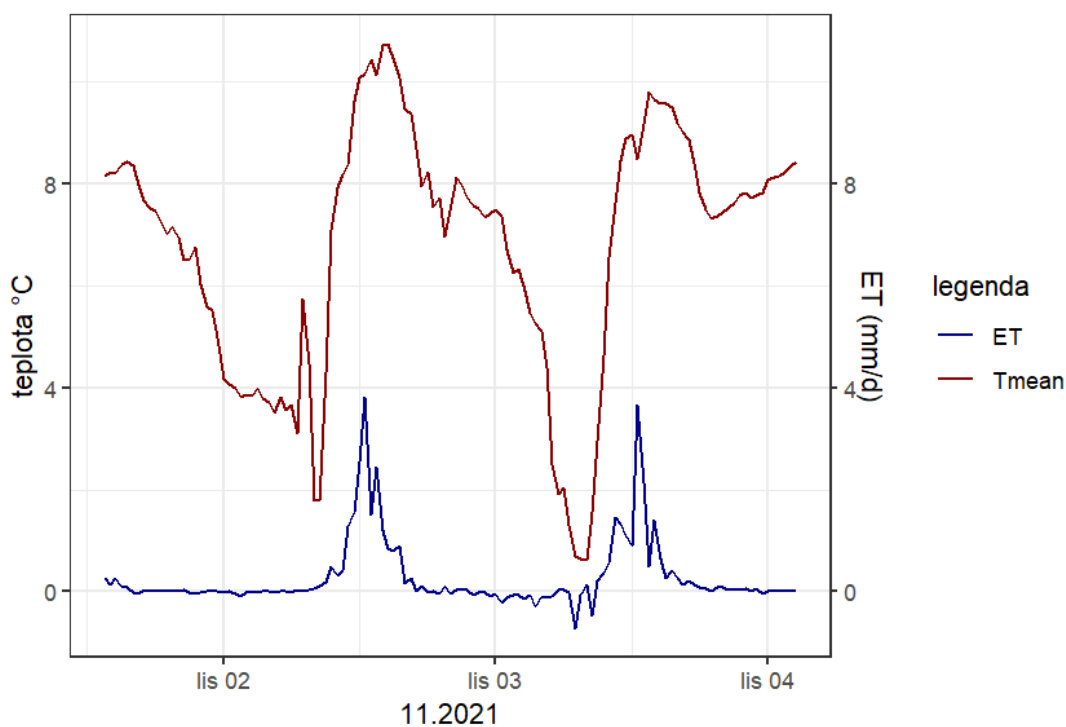


Graf 38: říjen 2021, ET a střední teploty u Eddy Covariance

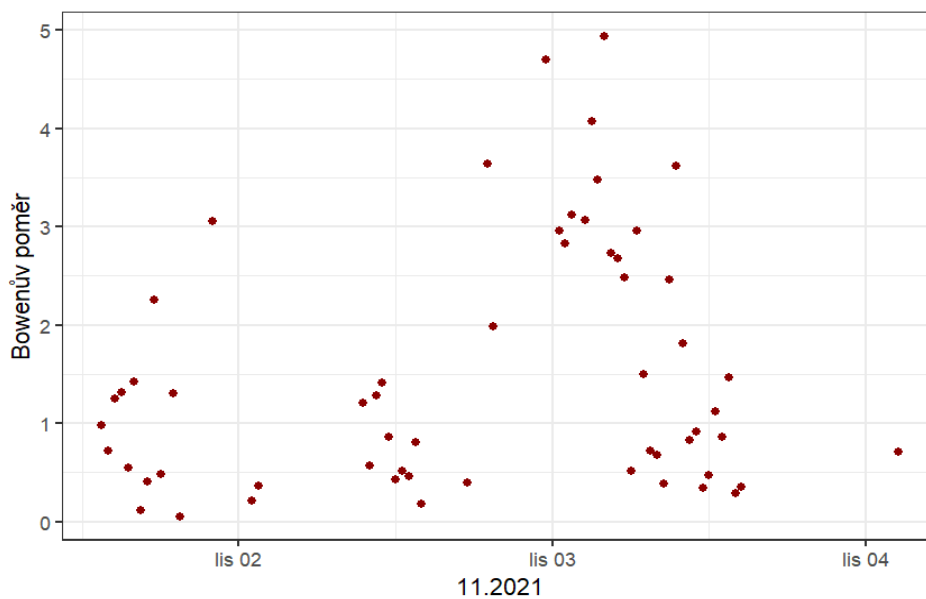


Graf 39: říjen 2021, Bowenův poměr u Eddy Covariance

Listopad 2021



Graf 40: listopad 2021, ET a střední teploty u Eddy Covariance



Graf 41: listopad 2021, Bowenův poměr u Eddy Covariance

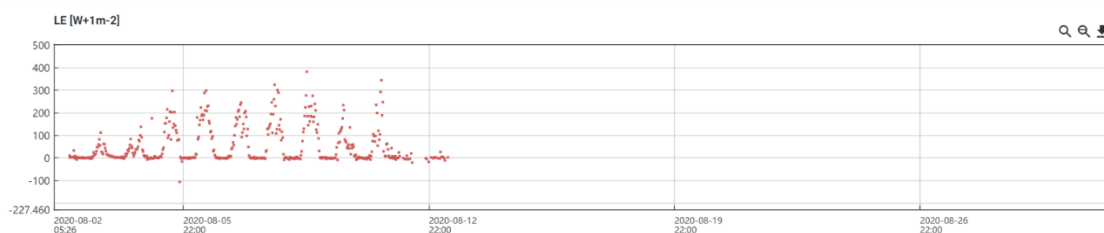
Jak jsem již zmiňovala v předchozích kapitolách, většina dat chybí v době nocí. V časové řadě se vyskytují i extrémní hodnoty, což je způsobeno skutečností, že vysokofrekvenční data mají vždy náhodné skoky kvůli šumu v elektronice a změnám atmosférických parametrů. Tyto hodnoty by měly být smazány a nahrazeny hodnotami klouzavého průměru. [46] Rovněž CNR4 modul má poruchu, a proto měření solární radiace neprobíhá správným způsobem.

Co se týče samotných dat, lze pozorovat, že největších hodnot ET bylo dosaženo v srpnu. Dál byla pozorovaná tendence poklesu hodnot v podzimním i zimním období. Maximálních hodnot výpar dosahoval mezi 12-16 hodinami. Tendence posunu intenzity ET bývá při poklesu teploty.

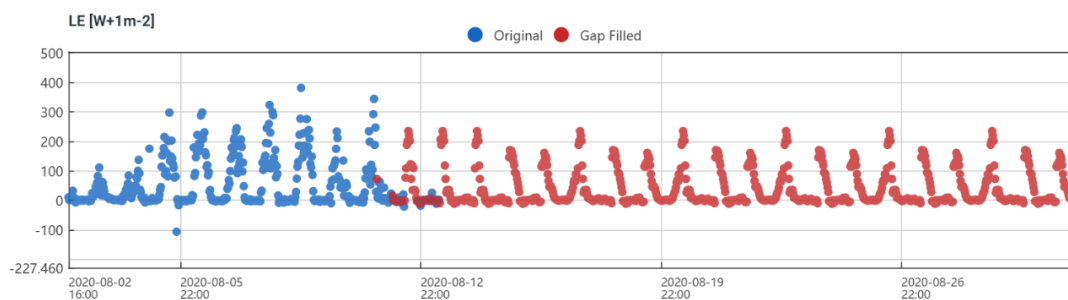
Problémem datové sady je také to, že mezery mezi měřeními jsou příliš velké, což vede ke značné komplikaci použití GF, a tedy k obtížné interpretaci výsledků.

5.4.3 Gap Filling

Srpen 2020 (Eddy Covariance)



Graf 42: srpen 2020, latentní teplo (LE) u Eddy Covariance



Graf 43: srpen 2020, vyplněné mezery

Efektivita použití metod Gap filling závisí i na lokalitě, především na typu krajinného pokryvu. Pro lokality s nízkým zápojem vegetace, mají Gap Filling metody méně chyb ve srovnání s vysokým zápojem. Nejlepší výsledky jsou na travnatých plochách, nejnižší přesnost Gap fillingu byla pozorována u lesních porostů. [81]

5.4.4 Energy balance residual (EBR) correction

Rovnice energetické bilance na povrchu Země:

$$R_n - G = LE + H,$$

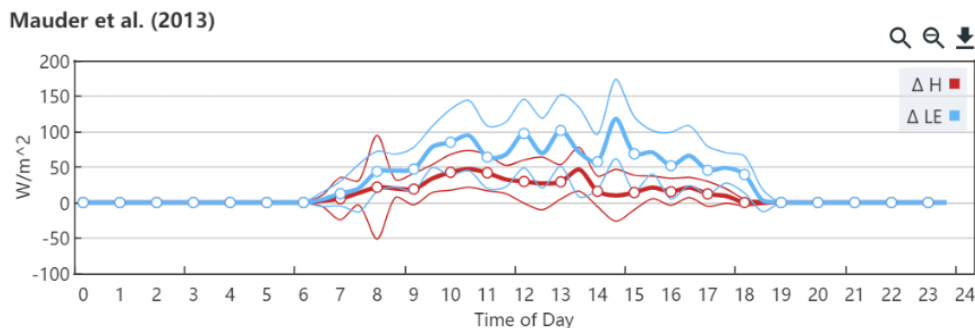
kde: R_n – záření, G – tepelný tok, LE – latentní teplo, H – citelné teplo

Levá část ($R_n - G$) představuje dostupnou energii pro výpar, zatímco výrazy na pravé straně (LE a H) jsou často označovány jako turbulentní toky.

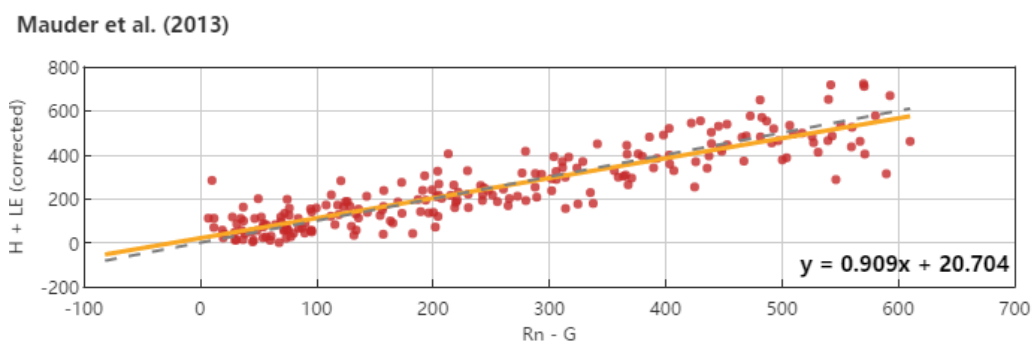
Velký vliv na hodnoty tepelných toků má značný, podobně jako na Gap Filling, vegetace. Např. ve studii [83] byli sledované 3 lokality: pole s sóji, kukuřici a vinice. Odhad citelného tepla byl spočítán pomocí Penman-Monteith metody, rovnice energetické bilance a Advection-Aridity metody, následné výpočty byly porovnané

s aktuálními hodnoty citelného tepla (H). Výsledky naznačují, že Penman-Monteith a Energetická bilance nejvíce koreluje s aktuálním citelným teplem u sóji a kukuřice, ale PM metoda nebyla schopna správně odhadnout citelné teplo u vinice.

Srpen 2020 (Eddy Covariance)

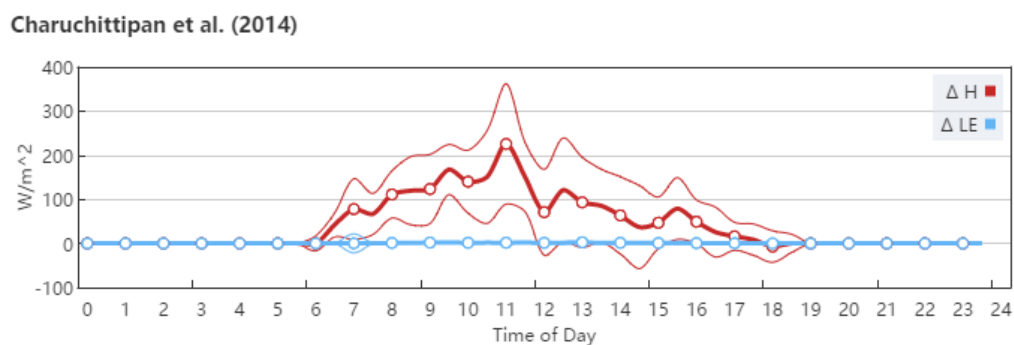


Graf 44: srpen 2020, energetická bilance



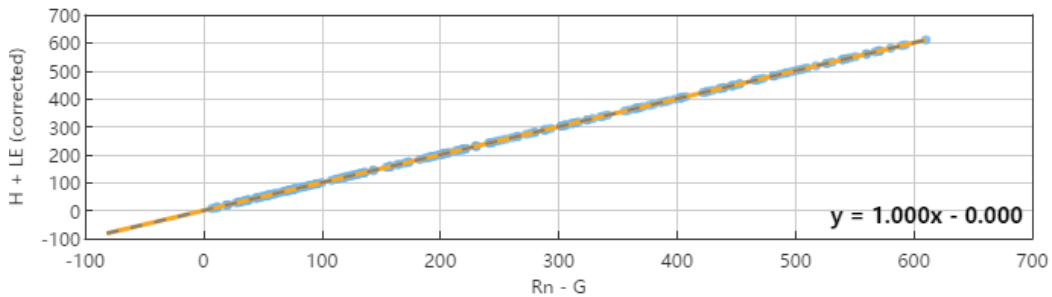
Graf 45: srpen 2020, korekce rezidui v rovnice energetické bilance

Metoda Mauder et al., (2013) vynucuje rovnice energetické bilance v denním časovém měřítku a rozděljuje zbytkovou energii tak, aby byl zachován Bowenův poměr (H/LE) před a po korekci ve 30minutových intervalech. [82]



Graf 46: srpen 2020, energetická bilance

Charuchittipan et al. (2014)



Graf 47: srpen 2020, korekce rezidují v rovnice energetické bilance

Metoda Charuchittipana et al., (2014) vynucuje rovnice energetické bilance ve 30minutových intervalech a připisuje větší část zbytkové energie citelnému teplu (H), proto se významně zvyšuje Bowenův poměr po většinu období. Důvodem je, že velké koherentní struktury, které nejsou zachyceny metodou vířivé kovariance, jsou poháněny vztlakem, a proto zahrnují primárně další citelné tepelné toky. [82]

5.4.5 Porovnání přímých a nepřímých metod

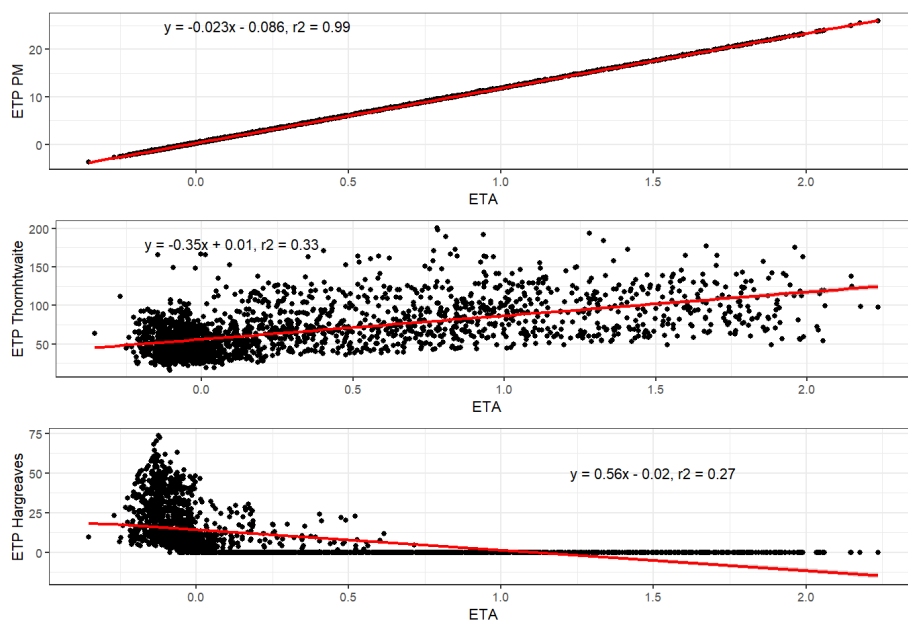
Pomocí metody zobecněné lineární regrese (GLM) a koeficientu Spearmana byly porovnané hodnoty aktuální a potenciální evapotranspirace (Penman-Monteith, Thornthwaite a Hargreaves) měřena ve dvou lokalitách (lokace Scintilometu a Eddy Covariance) ve vybraných měsících.

Porovnání přímých a nepřímých metod měření evapotranspirace je předmětem výzkumu řady vědeckých studií. Nejpopulárnější metodou nepřímého odhadu potenciální evapotranspirace je Penman-Monteith rovnice.

V několika studiích bylo prokázáno, že hodnoty aktuální evapotranspirace jsou nižší než hodnoty potenciální evapotranspirace. Např. ve výzkumu [84] byly porovnané hodnoty aktuální evapotranspirace naměřené pomocí Eddy Covariance věže a hodnoty potenciální evapotranspirace spočítané Penman-Monteithovou rovnicí (od roku 2012 – 2019). Studie ukázala, že v dubnu a první půlce leta denní hodnoty aktuální evapotranspirace jsou o 20 % nižší než hodnoty potenciální. To může být způsobeno tím, že rostliny v dané lokalitě nejsou schopny využít veškerou dostupnou vodu k transpiraci, neboť jsou limitovány dalšími faktory, jako jsou například nedostatek živin, nízká teplota nebo nedostatek slunečního záření.

Extrémně velké hodnoty potenciální evapotranspirace by mohly být způsobeny nějakou chybou v modelu nebo vstupních datech, nebo mohou odrážet skutečné meteorologické podmínky v dané oblasti. Je důležité být opatrný při interpretaci takových výsledků a porovnat je s jinými nezávislými daty, například s daty o aktuální evapotranspiraci získanými pomocí jiných metod, nebo s měřeními srážek a průtoku vody v dané oblasti.

Scintilometr
červen 2020



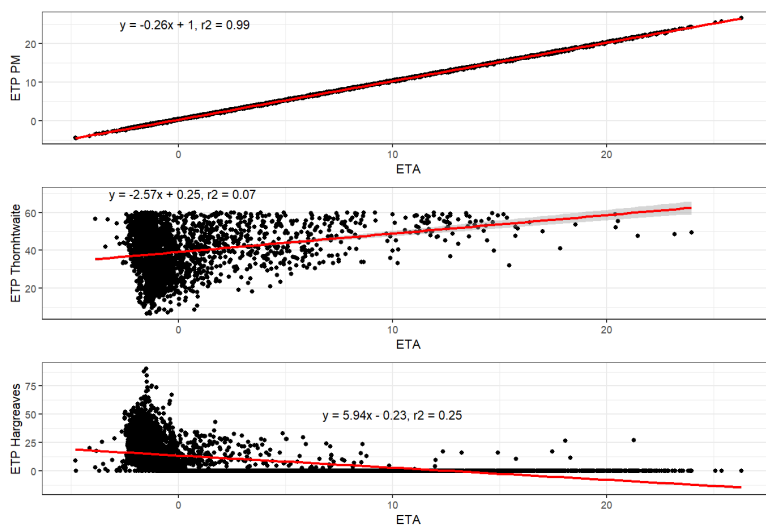
Graf 48: červen 2020, porovnání ETA s ETP u scintilometru

Spearmanův korelační koeficient

Metoda	Rs
Penman-Monteith	0.99
Thorthwaite	0.55
Hargreaves	-0.82

Tab. 9

červenec 2020



Graf 49: červenec 2020, porovnání ETA s ETP u scintilometru

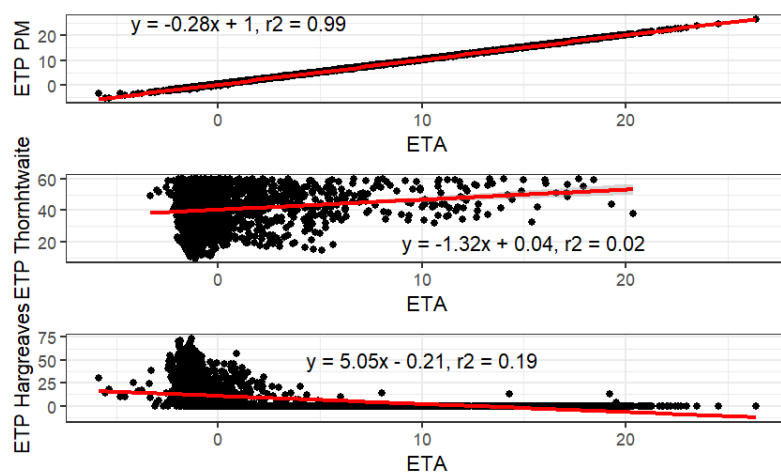
Spearmanův korelační koeficient

Metoda	Rs
Penman-Monteith	0.99
Thorthwaite	0.14
Hargreaves	-0.78

Tab. 10

Penman-Monteith metoda nejvíce koreluje s hodnotami scintilometru. Metoda Thorntwaite rovněž vykazuje statistickou významnost. Zatímco Hargreaves má spíše negativní korelace.

Srpen 2020



Graf 50: srpen 2020, porovnání ETa s ETp u scintilometru

Spearmanův korelační koeficient

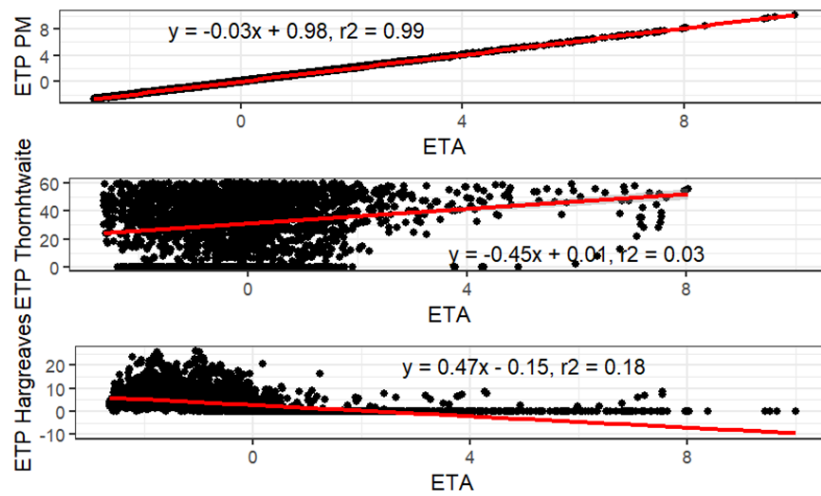
Metoda	Rs
Penman-Monteith	0.99
Thorthwaite	0.10
Hargreaves	-0.75

Tab. 11

Ve srovnání s ostatními měsíci v červnu Thorthwaite metoda má statistickou významnost, ale ve všech měsících nejvíce koreluje Penman-Monteith.

Ve výzkumu [85] bylo prokázáno, že ve srovnání s Penman-Monteith Thorthwaite metoda značně nadhodnocuje hodnoty výparu v vlhkých oblastech a podhodnocuje v aridních a semiaridních oblastech. Největší korelace byla pozorovaná v jarních a letních měsících. Protože metoda Thornthwaite je empirická metoda založená na pozorováních provedených na východě Spojených Států, jeho aplikace v jiných klimatických podmínkách není vždycky vhodná. [85]

Listopad 2021



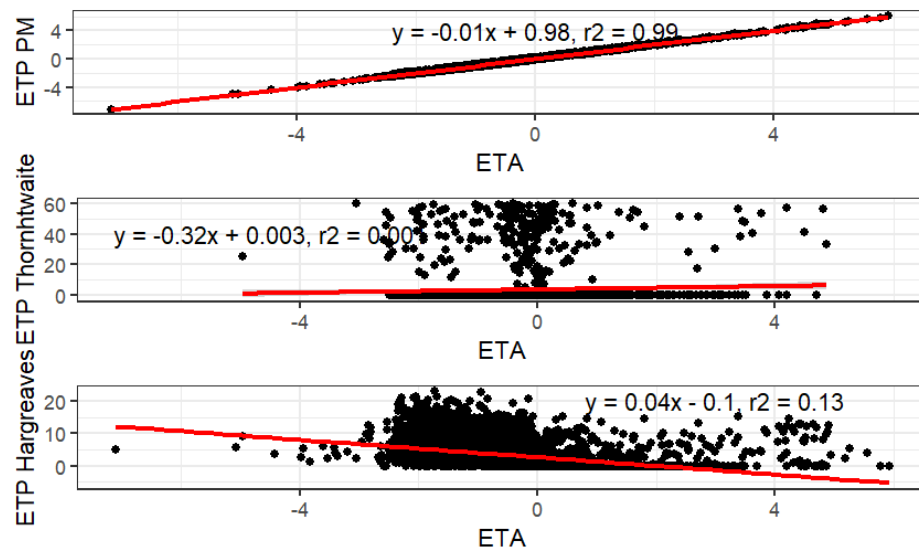
Graf 51: listopad 2021, porovnání ETa s ETp u scintilometru

Spearmanův korelační koeficient

Metoda	Rs
Penman-Monteith	0.99
Thorthwaite	0.17
Hargreaves	-0.72

Tab. 12

Prosinec 2021



Graf 52: prosinec 2021, porovnání ETa s ETp u scintilometru

Spearmanův korelační koeficient

Metoda	Rs
Penman-Monteith	0.99
Thorthwaite	0.007
Hargreaves	-0.54

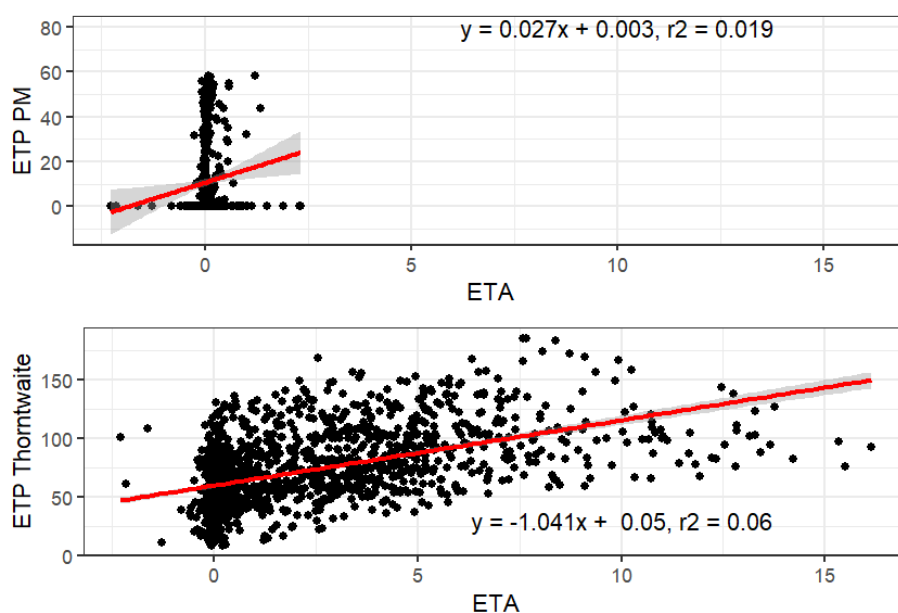
Tab. 13

Největší statistickou významnost má Penman-Monteith metoda. Metoda Thorthwaite má nízkou korelace s aktuálním výparem. Hargreaves rovnice vždy ukazuje negativní korelaci.

Korelace mezi aktuální a potenciální evapotranspirací je určena množstvím dostupné vody a energie. V případě nedostatku vody může být korelace mezi ETa a ETp negativní. Ve studii [86] bylo prokázáno, že v suchých lokalitách korelace mezi ETa a ETp (Thorthwaite a Penman-Monteith metoda) byla negativní. Ve vlhkých oblastech byla naopak pozitivní.

Eddy Covariance

Červenec 2020



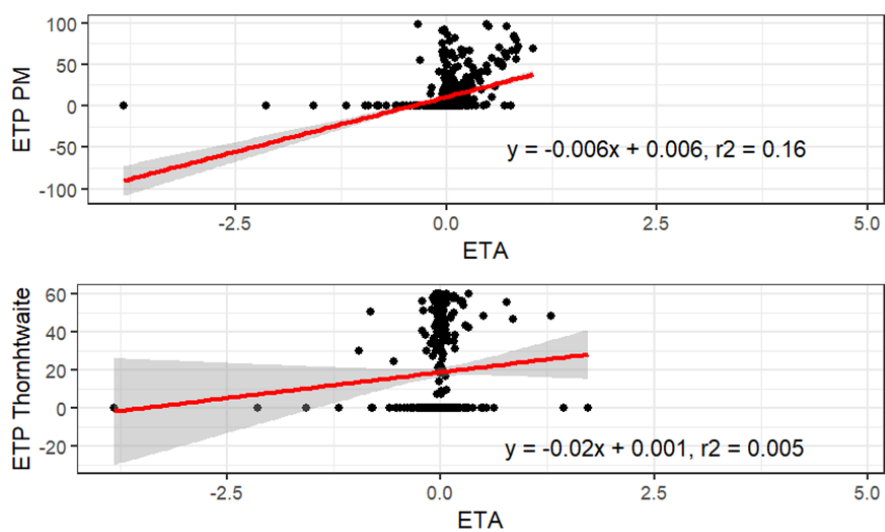
Graf 53: červenec 2020, porovnání ETa s ETp u Eddy Covariance

Spearmanův korelační koeficient

Metoda	rs
Penman-Monteith	0.34
Thorthwaite	0.58

Tab. 14

Únor 2021

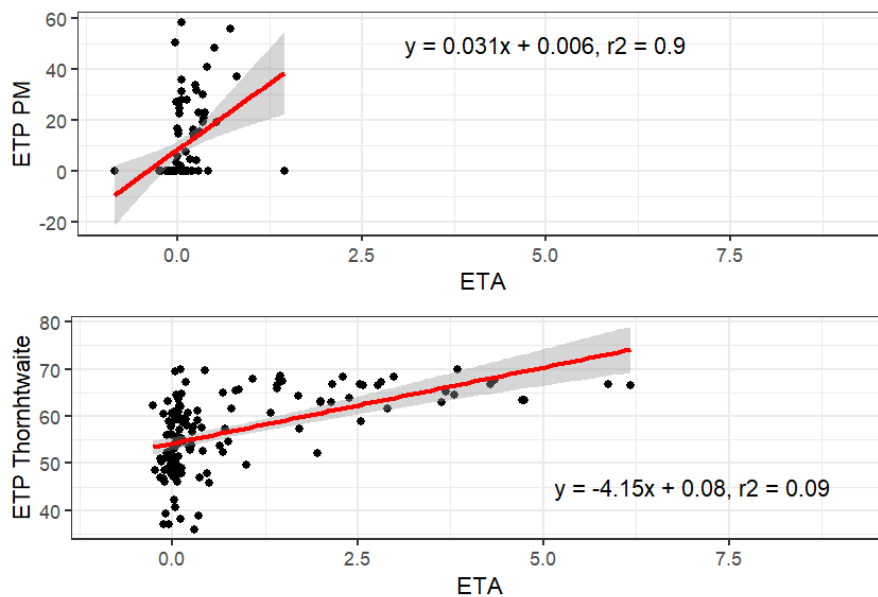


Graf 54: únor 2021, porovnání ETa s ETP u Eddy Covariance

Metoda	rs
Penman-Monteith	0.52
Thorthwaite	0.003

Tab. 15

Srpen 2021

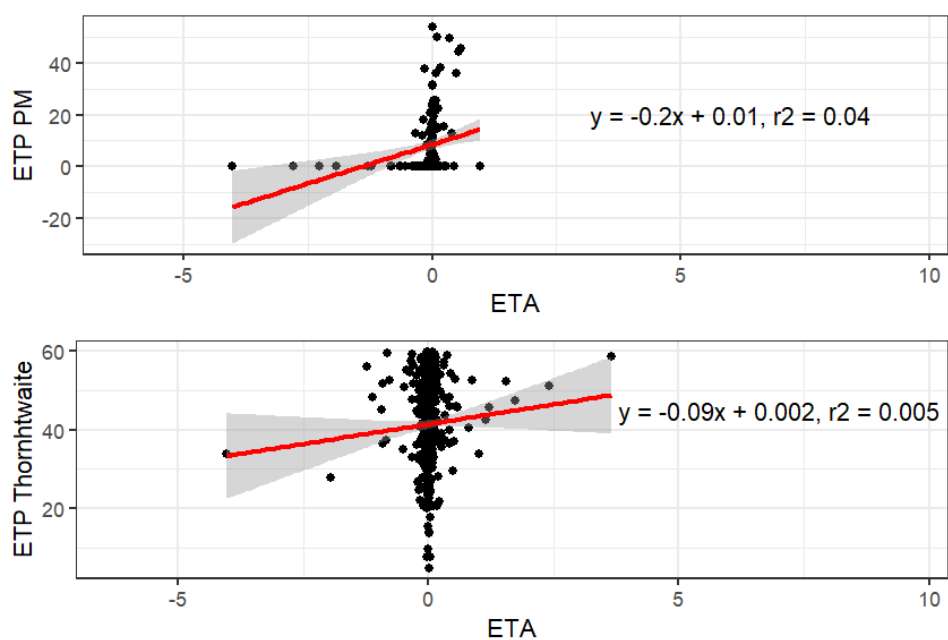


Graf 55: Srpen 2021, porovnání ETa s ETP u Eddy Covariance

Metoda	rs
Penman-Monteith	0.43
Thorthwaite	0.59

Tab. 16

Září 2021



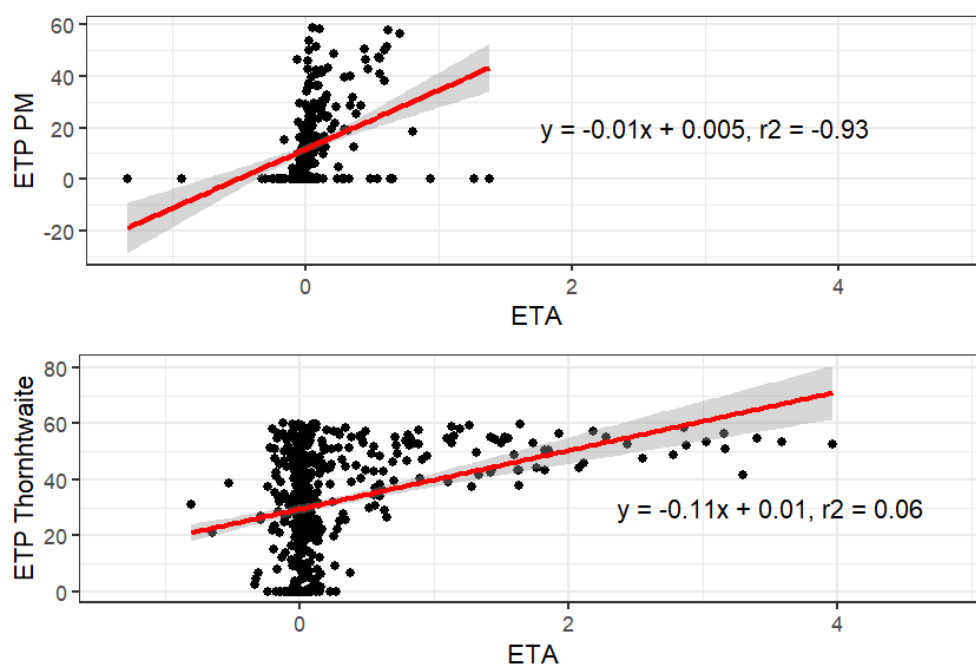
Graf 56: září 2021, porovnání ETa s ETp u Eddy Covariance

Spearmanův korelační koeficient

Metoda	rs
Penman-Monteith	0.46
Thorthwaite	0.012

Tab. 17

Říjen 2021



Graf 57: říjen 2021, porovnání ETa s ETp u Eddy Covariance

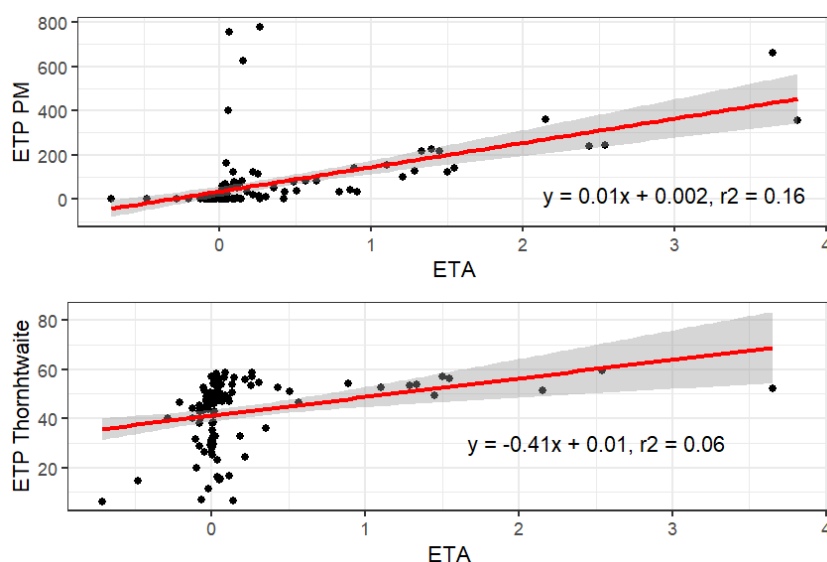
Spearmanův korelační koeficient

Metoda	rs
Penman-Monteith	0.49
Thorthwaite	0.23

Tab. 18

U Eddy Covariance nelze jednoznačně říct jaká nepřímá metoda je nejvhodnější. Penman-Monteith rovnice má ve většině případů vyšší korelaci než Thorthwaite. V červenci 2020 má výpočet dle metody Thorthwaite větší korelace s aktuálním výparem, než Penman-Monteith, v některých měsících má Thorthwaite malou korelaci (např. únor 2021 a září 2021) přičemž jenom v roce 2020 ukazuje větší souvislost s aktuálním výparem. To může být způsobeno nízkou kvalitou aktuálních dat v roce 2020 ze systému Eddy Covariance.

Listopad 2021



Graf 58: listopad 2021, porovnání ETa s ETp u Eddy Covariance

Metoda	rs
Penman-Monteith	0.48
Thorthwaite	0.50

Tab. 19

Na rozdíl od scintilometru ne ve všech měsících má Penman-Monteith metoda významnou korelaci. V měsících, kde Penman-Monteith má nízkou korelaci, má zcela opačné hodnoty korelace Thorthwaite metoda.

Odhady potenciální evapotranspirace Penman-Monteithovou a Thorthwaitovou metodou mohou být značně odlišné. To ukazuje výzkum [87], v němž bylo prokázáno, že v tropických oblastech dává metoda Thorthwaite mnohem vyšší hodnoty než Penman-Monteith, opačný trend byl následně pozorován v subtropích. Ve vyšších zeměpisných šířkách jsou rozdíly menší. Nadhodnocení potenciálního výparu v tropech a podhodnocení v subtropích u Thorthwaite metody může být způsobeno

jednoduchou parametrizací. Nadhodnocení je pravděpodobně spojeno s vyloučením hodnot oblačnosti a tlaku. Naopak v chladnějších oblastech Throthwaite metoda podceňuje výpar, a to například v případě, kdy jsou teploty pod bodem mrazu, ale podle Throthwaite metody budou hodnoty ET_p nabývat 0, zatímco podle Penman-Monteithovy rovnice bude výpar probíhat, ale nebude nabývat nulových hodnot.

Diskuse

Je důležité konstatovat, že vhodné využití zařízení, smazání extrémních hodnot a následná korektní statistická analýza (zejména vhodné testy) časových řád značně minimalizují možné chyby v měření, které často nastávají v průběhu experimentu.

Při provádění experimentu metodou Eddy Covariance je nejzásadnější otázkou stanovení footprintu a sledování výšky porostu. Důležité je brát v úvahu tu skutečnost, kvůli jejímž podmínkám atmosféry v době nocí může nastat situace, v níž se v datech vyskytnou mezery. Důsledkem ale může být absence více než 60 % [71] hodnot. Ještě před začátkem experimentu musíme řádně prozkoumat a brát v potaz klimatické a terénní podmínky zkoumané lokality. Hrozí také riziko ztráty dat v lokalitách s velkým srážkovým úhrnem. Na tuto skutečnost ukazuje řada studií. Toto je v zájmovém území částečně řešeno výběrem enclosed EC, která umožňuje sběr dat i ve srážkovém období. Naproti tomu metoda měření scintilometru v takových podmínkách neměří.

V hospodářsky využívaných lokalitách je důležité vědět, jaké problémy mohou nastat při měření. To může být zkruseno přítomností agrotechniky, změnou hospodaření na půdě apod. Tyto parametry jsou také nutné pro realizaci kvalitního experimentu. A proto je vhodným řešením instalace kamer v okolí zařízení. Kamerou je v současné době vybaven pouze systém Eddy Covariance. V případě systému scintillometru by bylo vhodné využít data z bezpečnostních kamer, které bývají v okolí instalovány.

Správná volba metody měření závisí na meteorologických parametrech. Například ze studie [69] vyplývá, že je vhodnější pro měření výparu metoda s „otevřenou cestou“ (open path), protože použití „uzavřené cesty“ (closed path) může způsobit podhodnocení turbulentních toků. Ve většině praktických studií je nejvhodnější délka trubky cca. 0,7 m, ale pro sledování hodnot H_2O je lepším řešením použití co nejkratší trubky (0,4–0,7m) z důvodu redukovaní nepřesností, které jsou spojené se zmenšením fluktuací vodní páry v delších trubkách. [46] Při zašpinění stěn trubky a velké relativní vlhkosti dochází ke zmenšení fluktuací. [88]

Systém „krátké uzavřené cesty“ (enclosed path) má své silné stránky, protože riziko ztráty dat v důsledku námrazy a srážek je minimální. Při použití enclosed path potřebujeme brát v úvahu efekt zpoždění (vzduch z anemometru se dostává do analyzátoru se zpožděním v několik sekund). Bez zohlednění této časové prodlevy fluktuace (w) nebude správně korelovat s kolísáním plynů a výsledky mohou být značně podceněné. Efekt zpoždění se dá často řešit dvěma způsoby: teoreticky (pomocí rychlosti potoků, průměru trubky atd.) a empiricky (metodou maximální korelace, tzn. vzájemným posunem signálu pro dosažení co největší korelace).

Maximální korelaci je možné použít pouze pokud jsou splněny následující podmínky: dostatečně vyvinutá turbulence (rychlost větru $> 1 \text{ m/s}$, $u^* > 0,1$) a dostatečně silné turbulentní potoky (aby byla vysoká korelace mezi w a c) [46]

Určitou nevýhodou EC je citlivost k podmínkám atmosféry, kvůli čemuž je problematické systém EC umístit ve složitém terénu.

Jak jsem zmiňovala, výhodou scintillometrů je schopnost měřit citelné a latentní tepelné toky ve velkých prostorových měřítkách, aniž by bylo ztraceno značné množství dat. Oblast footprintu neovlivňuje měření v takové míře jako to u Eddy Covariance. Scintilometr je méně citlivý na atmosférické výkyvy, a proto je možnost použití v podmínkách aktivního hospodaření na půdě.

Porovnání EC a SC metodami statistické analýzy je značně komplikované z důvodu přítomnosti velkých mezer v datech u EC.

U přímých metod existuje řada omezení a danou hodnotu výparu určujeme pomocí odhadu. Problémem bývá také to, že mohou chybět data podstatné pro výpočet (absence meteorostanic atd.).

Pro odhad potenciální evapotranspirace Penman-Monteithova rovnice je doporučena jako standart (dle Organizace pro výživu a zemědělství), ale použití metody může být omezeno absencí meteorologických dat. Ve studii [89] Penman-Monteith metoda byla porovnaná s Hargreaves metodou. Bylo zjištěno, že Hargreaves rovnice nadhodnocuje hodnoty potenciální evapotranspirace v humidních oblastech. Studie ukázala, že průměrné rozdíly ve výsledcích se pohybovaly od 15 do 29 %.

Ve studii [90] byly porovnané Penman-Monteith, Hargreaves a Thornthwaite metody. Metoda Thornthwaite byla výrazně citlivá k teplotním výkyvům, Hargreaves metoda byla rovněž citlivá na změnu teplot, ale korelace s teplotou byla nižší než u Thornthwaite. Penman-Monteithova metoda má pozitivní korelace s rychlostí větru a délkou slunečního svitu. Thornthwaite metoda má vysokou korelaci s Hargreaves metodou ($R = 0.65$, $p < 0.05$), zatímco korelace s Penman-Monteith metodou byla nízká.

Nejvhodnější metodou pro zájmovou lokalitu je Penman-Monteith ($R = 0.99$, $p < 0.001$) u scintilometru. U Eddy Covariance má občas Penman-Monteith nižší korelace než Thornthwaite, zatímco korelace Thornthwaite u scintilometru je mnohem menší a je významná jen v měsíci červnu (rok 2020).

Thornthwaiteova metoda je založena na empirických pozorováních provedených na východě Spojených států a její aplikace v jiných klimatických podmínkách může být omezená. Bylo prokázáno, že ve srovnání s Penman-Monteith metodou značně nadhodnocuje hodnoty výparu v mokřích oblastech a podhodnocuje v suchých a polosuchých oblastech. [85]

Hodnoty Bowenova poměru byly značné vysoké. Zvýšené hodnoty Bowenova poměru naznačují, že v této oblasti může být potenciální nedostatek vody a mohlo by být nutné provést další opatření pro udržení dostupnosti vody a regulaci teploty.

V oblastech, kde bývá nedostatek vláhy v půdě, bude aktuální hodnota evapotranspirace mnohem nižší než její potenciální hodnota. To znamená, že aktuální evapotranspirace souvisí spíše s intenzitou srážek než s potenciálním výparem [87].

Závěr

I přesto, že v dnešní době existuje nemalý počet metod a typů aparatur na zjištění intenzity výparu, je netriviálním úkolem udělat správný výzkumný design projektu a získat co nejpřesnější data.

V první části práce byla provedena analýza současného umístění stanic a byly zjištěny nedostatky, které vedly k nerelevantním datům. Na základě této analýzy byly navrženy nové lokality pro umístění stanic, která by měla vést k lepší kvalitě dat. Další důležitou součástí práce bylo porovnání a výběr nejspolehlivější nepřímé metody odhadu evapotranspirace.

Je problematické vybrat správnou metodu pro konkrétní lokalitu, neboť je potřeba znát co nejvíce detailních informací o zájmovém území (směr převládajícího větru, dynamika růstu porostu, možné nežádoucí vlivy okolí atd.), což vyžaduje i značné množství času. Další problém představuje vhodná metoda redukce mezer v datové sadě. Existuje řada technik GP, ale i tyto jsou svým způsobem limitované.

Pro území Amálie mají nejrelevantnější výsledky data ze scintilometru (nejsou mezery v datech, vysoká korelace s Penman-Monteith a Hargreaves metodou, takto pořízená data není třeba filtrovat atd.). Nejspolehlivější nepřímou metodou v klimatických podmínkách lokality Amálie metoda Penman-Monteith.

Problémem Eddy Covariance byli velké mezery v datech, které nelze použít přesto že tato data byla pomocí tzv. Gap Fillingu (převážně v roce 2020) doplněna. To bylo způsobeno především nedostatečným čištěním filtrů. V roce 2021 byla datová sada více použitelná z důvodu zlepšení metodiky monitoringu a čištění zanášení filtrů.

Pro dosažení výsledků, které budou odpovídat realitě je vždy nutné vyřešit následující problémy: umístění věže, instalaci zařízení, kontrolu zápisu a přenosu dat na PC, shromažďování a zpracování dat a technickou údržbu přístroje.

Vzhledem k tomu, že nepřímé metody požadují různé vstupní parametry, je nutné znát podmínky zkoumané lokality a přesně formulovat výzkumné otázky.

Literatura

- [1] RIVAS, Raul a Vicente CASELLES. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2004, **93**(1–2), 68–76. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2004.06.021
- [2] BERAN, Adam, Ladislav KAŠPÁREK, Adam VIZINA a Petra ŠUHÁJKOVÁ. Ztráta vody výparem z volné vodní hladiny | VTEI. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2019, **61**(4), 12–18.
- [3] ŠÍR, Miloslav, Miroslav TESAR a Lubomir LICHNER. *Klimatická změna a transpirace rostlin Plant transpiration and hydrologic cycle View project Effect of land use management practices on carbon sequestration View project*. 2002.
- [4] *What is Evaporation? - Definition & Examples - Video & Lesson Transcript | Study.com*.
- [5] URBAN, Lukáš. *Odhad evapotranspirace městské zeleně v areálu Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (Diplomová práce) České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební*. 2017.
- [6] HOUDEK, Tomáš. *Metody stanovení evapotranspirace a její hodnoty v České republice*. 2012.
- [7] *Martin Možný (ČHMÚ)*. nedatováno.
- [8] TOLASZ, Radim. *Atlas podnebí Česka*. 2007. ISBN 978-80-86690-26-1.
- [9] *Evaporation - an overview | ScienceDirect Topics*.
- [10] FAO. *Chapter 1 - Introduction to evapotranspiration*.
- [11] *Growth, water use and yield of barley in Mediterranean-type environments: Elektronické publikace dostupné na ČZU*.
- [12] CONNOR, D. J., S. THEIVEYANATHAN a G. M. RIMMINGTON. Development, growth, water-use and yield of a spring and a winter wheat in response to time of sowing. *Australian Journal of Agricultural Research* [online]. 1992, **43**(3), 493–516. ISSN 00049409. Dostupné z: doi:10.1071/AR9920493
- [13] *The influence of crop management on the water balance of lupin and wheat cr...: Elektronické publikace dostupné na ČZU*.
- [14] PIVEC, Jan a Václav BRANT. *Skutečná spotřeba vody vybranými kulturními a plevelnými druhy rostlin stanovená v polních podmínkách*. nedatováno.
- [15] SAN JOSÉ, J. J., R. BRACHO, R. MONTES a N. NIKONOVA. Comparative energy exchange from cowpeas (*Vigna unguiculata* (L.) Walp cvs. TC-9-6 and M-28-6-6) with differences in canopy architectures and growth durations at the Orinoco llanos. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2003, **116**(3–4), 197–219. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/S0168-1923(02)00211-3

- [16] ALLEN, Richard G, Luis S PEREIRA a Dirk RAES. *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. nedatováno.
- [17] YEE, Mei Sun, Jason BERINGER, Valentijn R N PAUWELS, Edoardo DALY, Jeffrey P WALKER a Christoph RÜDIGER. *Measuring evapotranspiration: comparison of eddy covariance, scintillometers and enclosed chambers*. 2014.
- [18] *Psychrometric constant - AMS Glossary*.
- [19] MACOUNOVÁ, Anna. *Problematika určení evapotranspirace*. B.m., 2007. b.n.
- [20] BRANT, Václav, Jan PIVEC a Milan KROULÍK. *Ekologické dni, mezinárodní vědecká konference, Stará Lesná Evapotranspirační nároky porostů obilnin v oblastech s nedostatkem srážek*. nedatováno.
- [21] ROŽNOVSKÝ, J a T LITSCHMANN. *SROVNÁNÍ VÝPOČETNÍCH METOD POTENCIÁLNÍ EVAPOTRANSPIRACE*. 2005.
- [22] KOTT, Ivan. *Vláhová bilance na území České republiky v letech 1974. -1990. Sborník prací ČHMÚ* . 1992.
- [23] HASELOW, Lisa, Holger RUPP, Andrej A BONDAROVICH a Ralph MEISSNER. *Measurement and estimation of evapotranspiration in semi- arid grassland during the summer season in southwest Siberia* [online]. 2019, **8**(3), 257–266. Dostupné z: doi:10.18393/ejss.567359
- [24] PENMAN, H. L. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* [online]. 1948, **193**(1032), 120–145. ISSN 0080-4630. Dostupné z: doi:10.1098/rspa.1948.0037
- [25] BUDÍK, Ladislav, Petr ŠERCL, Pavel KUKLA, Petr LETT a Martin PECHA. *Odvození základních hydrologických údajů za referenční období 1981-2010*. nedatováno.
- [26] BUDYKO, M. I. (Mikhail Ivanovich). *Climate and life*. B.m.: Gidrometeoizdat. 1971
- [27] ROŽNOVSKÝ, J a T LITSCHMANN. *REFERENČNÍ EVAPOTRANSPIRACE*. 2005.
- [28] *Thermodynamics: Albedo | National Snow and Ice Data Center* [online]. [vid. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://nsidc.org/cryosphere/seaice/processes/albedo.html>
- [29] KRÁLOVÁ, Magda. *Absorpce slunečního záření | Eduportál Techmania*.
- [30] *Albedo* [online]. [vid. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://ru-ecology.info/term/15366/>
- [31] BRANT, Vaclav. *Hodnoty crop koeficientů stanovené na lokalitě Budihostice*.

1998, 3–5.

- [32] FAO. *Chapter 8 - ETc under soil water stress conditions*.
- [33] VALAYAMKUNNATH, Prasanth, Venkataramana SRIDHAR, Wenguang ZHAO a Richard G. ALLEN. Intercomparison of surface energy fluxes, soil moisture, and evapotranspiration from eddy covariance, large-aperture scintillometer, and modeling across three ecosystems in a semiarid climate. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2018, **248**, 22–47. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2017.08.025
- [34] CURTO, Lucía, Mauro COVI a María Isabel GASSMANN. Actual evapotranspiration and the pattern of soil water extraction of a soybean (*Glycine max*) crop. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 2019, **51**(2), 125–141. ISSN 18538665.
- [35] BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review* [online]. 1926, **27**(6), 779–787. ISSN 0031899X. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRev.27.779
- [36] *Bowen Ratio - an overview | ScienceDirect Topics*.
- [37] SAVAGE, M. J., C. S. EVERSON a B. R. METELERKAMP. Bowen ratio evaporation measurement in a remote montane grassland: Data integrity and fluxes. *Journal of Hydrology* [online]. 2009, **376**(1–2), 249–260. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.038
- [38] JAKUB BROM. *Hodnocení tepelné bilance a evapotranspirace travního porostu metodou Bowenova poměru – návod do praktika z produkční ekologie PřF JU*. červen 2008.
- [39] ŠACHL, Jiří. *Analýza mikroklimatu různě obhospodařovaných ploch*. B.m., 2013. JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH.
- [40] *Lysimeters - an overview | ScienceDirect Topics*.
- [41] MOORHEAD, Jerry E., Gary W. MAREK, Paul D. COLAIZZI, Prasanna H. GOWDA, Steven R. EVETT, David K. BRAUER, Thomas H. MAREK a Dana O. PORTER. Evaluation of sensible heat flux and evapotranspiration estimates using a surface layer scintillometer and a large weighing lysimeter. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2017, **17**(10). ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s17102350
- [42] ALFIERI, Joseph G., William P. KUSTAS, John H. PRUEGER, Lawrence E. HIPPS, Steven R. EVETT, Jeffrey B. BASARA, Christopher M.U. NEALE, Andrew N. FRENCH, Paul COLAIZZI, Nurit AGAM, Michael H. COSH, José L. CHAVEZ a Terry A. HOWELL. On the discrepancy between eddy covariance and lysimetry-based surface flux measurements under strongly advective conditions. *Advances in Water Resources* [online]. 2012, **50**, 62–78. ISSN 03091708. Dostupné z: doi:10.1016/j.advwatres.2012.07.008
- [43] *Testing the Penman formula by means of lysimeters | Informatie voor professionals in voedsel en groen*.

- [44] FOKEN, Thomas. THE ENERGY BALANCE CLOSURE PROBLEM: AN OVERVIEW. *Ecological Applications* [online]. 2008, **18**(6), 1351–1367 [vid. 2021-03-27]. ISSN 1051-0761. Dostupné z: doi:10.1890/06-0922.1
- [45] *Eddy Covariance - an overview | ScienceDirect Topics.*
- [46] BURBA, G, Y KURBATOVA, O KURICHEVA, V AVILOV a V MAMKIN. *Метод турбулентных пульсаций Краткое практическое руководство. Metoda Eddy Covariance. Kratký praktický návod.* 2016.
- [47] CHEN, Han, Jinhui Jeanne HUANG, Kai WANG a Edward MCBEAN. Quantitative Assessment of Agricultural Practices on Farmland Evapotranspiration Using EddyCovariance Method and Numerical Modelling. *Water Resources Management* [online]. 2020, **34**(2), 515–527. ISSN 15731650. Dostupné z: doi:10.1007/s11269-019-02448-9
- [48] ZHAO, Xiaosong a Yao HUANG. A comparison of three gap filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes in short vegetation ecosystems. *Advances in Meteorology* [online]. 2015, **2015**. ISSN 16879317. Dostupné z: doi:10.1155/2015/260580
- [49] FALGE, Eva, Dennis BALDOCCHI, Richard OLSON, Peter ANTHONI, Marc AUBINET, Christian BERNHOFER, George BURBA, Reinhart CEULEMANS, Robert CLEMENT, Han DOLMAN, André GRANIER, Patrick GROSS, Thomas GRÜNWALD, David HOLLINGER, Niels Otto JENSEN, Gabriel KATUL, Petri KERONEN, Andrew KOWALSKI, Chun Ta LAI, Beverley E. LAW, Tilden MEYERS, John MONCRIEFF, Eddy MOORS, J. William MUNGER, Kim PILEGAARD, Üllar RANNIK, Corinna REBMANN, Andrew SUYKER, John TENHUNEN, Kevin TU, Shashi VERMA, Timo VESALA, Kell WILSON a Steve WOFSY. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2001, **107**(1), 43–69. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/S0168-1923(00)00225-2
- [50] BRUIN, Henk De a Jiemin WANG. Scintillometry : a review. 2017, (April).
- [51] YEE, Mei Sun, Valentijn R.N. PAUWELS, Edoardo DALY, Jason BERINGER, Christoph RÜDIGER, Matthew F. MCCABE a Jeffrey P. WALKER. A comparison of optical and microwave scintillometers with eddy covariance derived surface heat fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2015, **213**, 226–239. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2015.07.004
- [52] *(PDF) Nepřímé určení indexu lomu vzduchu pro výpočet fyzikální redukce elektronických dálkoměrů.*
- [53] KIPP & ZONEN B.V. Instruction Manual, LAS Mk II Scintillometr. *International Business.* 2003.
- [54] *Amalie. Osevní plán (2019).* 2019.
- [55] *CHA 2012-2018 — Copernicus Land Monitoring Service* [online]. [vid. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land->

cover/lcc-2012-2018

- [56] DUFFKOVÁ, Renata. Influence of Soil Physical Properties and Terrain Relief on Actual Evapotranspiration in the Catchment with Prevailing Arable Land Determined by Energy Balance and Bowen Ratio. In: *Evapotranspiration - An Overview* [online]. 2013. Dostupné z: doi:10.5772/52810
- [57] ČGS. *Geologická mapa 1 : 25 000*.
- [58] PRAHA, Impuls. Geofyzikální průzkum. 2020, **220**.
- [59] ČGS. *Půdní mapa 1 : 50 000*.
- [60] LESŮ, Ústav pro hospodářskou úpravu Brandýs nad Labem. *Taxonomický klasifikační systém půd ČR*.
- [61] CHMI. *Počasi v ČR na automatických klimatologických stanicích ČHMÚ. Interaktivní mapa staniční sítě ČHMÚ*.
- [62] CHMI. *Portál ČHMÚ : Historická data : Počasí : Územní srážky*.
- [63] *Portál ČHMÚ : Historická data : Počasí : Mapy charakteristik klimatu* [online]. [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mapy-charakteristik-klimatu>
- [64] OUDIN, Ludovic, Lætitia MOULIN, Hocine BENDJOURI a Pierre RIBSTEIN. Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. *Hydrological Sciences Journal* [online]. 2010, **55**(2), 209–222. ISSN 21503435. Dostupné z: doi:10.1080/02626660903546118
- [65] KAHUDA, Daniel. Vyhodnocení geologických prací. 2020.
- [66] ZDRAŽIL, Vladimír, Petr SKLENIČKA, Martin HANEL, Petr MÁCA, Miroslav SVOBODA, Václav HRADILEK, Martin BOUDA a Radim MATULA. *CHYTRÁ KRAJINA II: LESNÍ KRAJINA V LOKALITĚ AMÁLIE - I. ETAPA*. 2020.
- [67] VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA. *HEIS, WMS server*.
- [68] CAMPBELL SCIENTIFIC, Inc. Weather Station Siting and Installation Tools. 1997, **1784**(435), 5.
- [69] MISSON, Laurent, D. D. BALDOCCHI, T. A. BLACK, P. D. BLANKEN, Y. BRUNET, J. CURIEL YUSTE, J. R. DORSEY, M. FALK, A. GRANIER, M. R. IRVINE, N. JAROSZ, E. LAMAUD, S. LAUNIAINEN, B. E. LAW, B. LONGDOZ, D. LOUSTAU, M. MCKAY, K. T. PAW U, T. VESALA, D. VICKERS, K. B. WILSON a A. H. GOLDSTEIN. Partitioning forest carbon fluxes with overstory and understory eddy-covariance measurements: A synthesis based on FLUXNET data. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2007, **144**(1–2), 14–31. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2007.01.006

- [70] CHEN, Bicheng, Marcelo CHAMECKI a Gabriel G. KATUL. Effects of Gentle Topography on Forest-Atmosphere Gas Exchanges and Implications for Eddy-Covariance Measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2020, **125**(11), e2020JD032581 [vid. 2021-03-21]. ISSN 2169-897X. Dostupné z: doi:10.1029/2020JD032581
- [71] FOLTÝNOVÁ, Lenka, Milan FISCHER a Ryan Patrick MCGLOIN. Recommendations for gap-filling eddy covariance latent heat flux measurements using marginal distribution sampling. *Theoretical and Applied Climatology* [online]. 2020, **139**(1–2), 677–688. ISSN 14344483. Dostupné z: doi:10.1007/s00704-019-02975-w
- [72] NAKAI, Taro, Tetsuya HIYAMA, Roman E. PETROV, Ayumi KOTANI, Takeshi OHTA a Trofim C. MAXIMOV. Application of an open-path eddy covariance methane flux measurement system to a larch forest in eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2020, **282–283**, 107860. ISSN 0168-1923. Dostupné z: doi:10.1016/J.AGRFORMET.2019.107860
- [73] SIEDLECKI, Mariusz, Włodzimierz PAWLAK, Krzysztof FORTUNIAK a Mariusz ZIELIŃSKI. Wetland Evapotranspiration: Eddy Covariance Measurement in the Biebrza Valley, Poland. *Wetlands* [online]. 2016, **36**(6), 1055–1067 [vid. 2022-02-20]. ISSN 19436246. Dostupné z: doi:10.1007/S13157-016-0821-0/FIGURES/11
- [74] *EddyPro. Software Instruction Manual* [online]. nedatováno [vid. 2021-03-21]. Dostupné z: www.licor.com/env/distributors
- [75] *Tovi-manual-17391.pdf | Powered by Box* [online]. [vid. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://licor.app.boxenterprise.net/s/7t9z11sw53qg1qe4dhga84mwgvs3e8ni>
- [76] *Hargreaves equation* [online]. Dostupné z: <https://pyeto.readthedocs.io/en/latest/hargreaves.html>
- [77] THORNTHWAITE, The. Potential evapotranspiration Thornthwaite equation Penman equation Description. 2004, (1948).
- [78] *Маргинальное распределение — Циклопедия* [online]. [vid. 2021-03-21]. Dostupné z: http://cyclowiki.org/wiki/Маргинальное_распределение
- [79] KIM, Yeonuk, Mark S. JOHNSON, Sara H. KNOX, T. Andrew BLACK, Higo J. DALMAGRO, Minseok KANG, Joon KIM a Dennis BALDOCCHI. Gap-filling approaches for eddy covariance methane fluxes: A comparison of three machine learning algorithms and a traditional method with principal component analysis. *Global Change Biology* [online]. 2020, **26**(3), 1499–1518 [vid. 2021-03-21]. ISSN 1354-1013. Dostupné z: doi:10.1111/gcb.14845
- [80] DOC. ING. VÁCLAV BRANT, PH.D., DR. ING. JAN PIVEC, ING. PETR ZÁBRANSKÝ, PH.D., ING. MICHAELA ŠKERÍKOVÁ, DOC. ING. MILAN KROULÍK, Ph.D. Vláhové nároky cukrové řepy. *Agromanual* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/vlahove-naroky-cukrove->

repy

- [81] JIANG, Yazhen, Ronglin TANG a Zhao Liang LI. A physical full-factorial scheme for gap-filling of eddy covariance measurements of daytime evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2022, **323**(June), 109087. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2022.109087
- [82] *Support: Tovi Software. Energy balance residual (EBR) correction* [online]. Dostupné z: <https://www.licor.com/env/support/Tovi/topics/toolbox-energy-balance-closure.html>
- [83] ERSHADI, A., M. F. MCCABE, J. P. EVANS a J. P. WALKER. Evaluation of Energy Balance, Combination, and Complementary schemes for estimation of evaporation. *IAHS-AISH Publication*. 2011, **344**(July), 52–56. ISSN 01447815.
- [84] SIEDLECKI, Mariusz, Włodzimierz PAWLAK a Krzysztof FORTUNIAK. Eddy covariance observations and FAO Penman-Monteith modelling of evapotranspiration over a heterogeneous farmland area. *Meteorologische Zeitschrift* [online]. 2022, **31**(3), 227–242. ISSN 16101227. Dostupné z: doi:10.1127/metz/2022/1064
- [85] CHEN, Deliang, Ge GAO, Chong Yu XU, Jun GUO a Guoyu REN. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research* [online]. 2005, **28**(2), 123–132. ISSN 0936577X. Dostupné z: doi:10.3354/cr028123
- [86] CHA, Yoonkyung, Seok Soon PARK, Kyunghyun KIM, Myeongseop BYEON a Craig A. STOW. Water Resources Research [online]. 2014, **5**(2), 5375–5377. ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1002/2013WR014979.Reply
- [87] VAN DER SCHRIER, G., P. D. JONES a K. R. BRIFFA. The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* [online]. 2011, **116**(3). ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/2010JD015001
- [88] MASSMAN, W. J. a A. IBROM. Attenuation of concentration fluctuations of water vapor and other trace gases in turbulent tube flow. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2008, **8**(20), 6245–6259. ISSN 16807324. Dostupné z: doi:10.5194/acp-8-6245-2008
- [89] TRAJKOVIC, Slavisa. Hargreaves versus Penman-Monteith. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2007, **133**(1), 38–42.
- [90] LI, Yang, Yaochen QIN a Peijun RONG. Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman–Monteith equation in environmental sensitive areas of China. *Atmospheric Research* [online]. 2022, **273**(April), 106178. ISSN 01698095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2022.106178



Přílohy

Příloha č. 1, Corine Land Use and Land Cover

Corine land cover classes

1. Artificial surfaces



1.1 Urban fabric

-  1.1.1. Continuous urban fabric
-  1.1.2. Discontinuous urban fabric



1.2 Industrial, commercial and transport units

-  1.2.1. Industrial or commercial units
-  1.2.2. Road and rail networks and associated land
-  1.2.3. Port areas
-  1.2.4. Airports

1.3 Mine, dump and construction sites



-  1.3.1. Mineral extraction sites
-  1.3.2. Dump sites
-  1.3.3. Construction sites

1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas




-  1.4.1. Green urban areas
-  1.4.2. Sport and leisure facilities

2. Agricultural areas

2.1 Arable land

-  2.1.1. Non-irrigated arable land
-  2.1.2. Permanently irrigated land
-  2.1.3. Rice fields





2.2 Permanent crops

-  2.2.1. Vineyards
-  2.2.2. Fruit trees and berry plantations
-  2.2.3. Olive groves

2.3 Pastures




-  2.3.1. Pastures

2.4 Heterogeneous agricultural areas





-  2.4.1. Annual crops associated with permanent crops
-  2.4.2. Complex cultivation patterns
-  2.4.3. Land principally occupied by agriculture
-  2.4.4. Agro-forestry areas

3. Forests and semi-natural areas






3.1 Forests

-  3.1.1. Broad-leaved forest
-  3.1.2. Coniferous forest
-  3.1.3. Mixed forest

3.2 Shrub and/or herbaceous vegetation associations



-  3.2.1. Natural grassland
-  3.2.2. Moors and heathland
-  3.2.3. Sclerophyllous vegetation
-  3.2.4. Transitional woodland shrub

3.3 Open spaces with little or no vegetation




-  3.3.1. Beaches, dunes, and sand plains
-  3.3.2. Bare rock
-  3.3.3. Sparsely vegetated areas
-  3.3.4. Burnt areas
-  3.3.5. Glaciers and perpetual snow

4. Wetlands

4.1 Inland wetlands



-  4.1.1. Inland marshes
-  4.1.2. Peatbogs

4.2 Coastal wetlands

-  4.2.1. Salt marshes
-  4.2.2. Salines
-  4.2.3. Intertidal flats

5. Water bodies

5.1 Inland waters

-  5.1.1. Water courses
-  5.1.2. Water bodies

5.2 Marine waters

-  5.2.1. Coastal lagoons
-  5.2.2. Estuaries
-  5.2.3. Sea and ocean

Příloha č. 2, seznam zkratek

ET – evapotranspirace

ET_a – aktuální evapotranspirace

ET_p – potenciální evapotranspirace

ET_o – referenční evapotranspirace

ET_c – evapotranspirace za normálních podmínek

ET_{c,adj} - evapotranspirace v nestandardních podmínkách

EC – eddy covariance

SC – scintilometr

GF – gap filling

MDS – Marginal Distribution Sampling Technique

EB – Energetická balance

PM – Penman-Monteith rovnice