

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta životního prostředí**

*Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování*



**Fakulta životního  
prostředí**

**Zpracování meteorologických dat ze stanice Eddy  
Covariance v lokalitě statku Amálie**

---

**Processing of meteorological data from the Eddy Covariance  
station in the location of Amalie site**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.**

Autor: **David Čejka**

2024 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

David Čejka

Krajinářství

Název práce

**Zpracování meteorologických dat ze stanice Eddy Covariance v lokalitě statku Amálie**

Název anglicky

**Processing of meteorological data from the Eddy Covariance station in the location of Amalie site**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je zpracování základního souboru meteorologických dat, která poskytují informaci o aktuální evapotranspiraci na lokalitě Amálie. V předložené práci budou zpracována a prezentována data ze stanice, která měří aktuální evapotranspiraci metodou Eddy kovariance.

### Metodika

Metodický postup se skládá s následujících kroků:

1. Sestavení základního souboru meteorologických a hydrologických dat
2. Zpracování raw dat Eddy kovariance na lokalitě Amálie dostupnými metodami v softwarovém nástroji TOVI
3. Příprava vstupních meteorologických a hydrologických dat v základním 30-minutovém kroku, potřebných pro pokročilé vyhodnocení aktuální evapotranspirace a sestavení energetické bilance povrchu.
4. Sumarizace, vizualizace a prezentace sestavených dat.

**Doporučený rozsah práce**

standardní, min. 40 stran

**Klíčová slova**

zpracování dat, meteorologická data, aktuální evapotranspirace, Eddy kovariance, energetická bilance

---

**Doporučené zdroje informací**

Aubinet, M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale (Eds.), et al. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis, Springer Atmospheric Sciences, 2011, s 450.

Web Science, Scopus and others

---

**Předběžný termín obhajoby**

2023/24 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Petr Máca, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 24. 11. 2023

**prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 3. 2024

**prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 05. 03. 2024

## **Prohlášení Autora**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: **Zpracování meteorologických dat ze stanice Eddy Covariance v lokalitě statku Amálie** vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

**David Čejka**

V Praze dne **26. 3. 2024**

---

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval doc. Ing. Petrovi Mácovi, Ph.D. za odborný dohled nejen nad touto prací, ale v průběhu celého studia. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu.

# **Zpracování meteorologických dat ze stanice Eddy Covariance v lokalitě statku Amálie**

## **Abstrakt**

Meteorologická data jsou klíčová pro pochopení fyzikálních a ekosystémových procesů v atmosféře a půdě. Stanice Eddy Covariance je speciální meteorologické stanice navržená pro sledování turbulentních toků plynů v atmosféře a jevů probíhající v zájemné interakci mezi povrchem země a atmosférou. Kvalitně měřená EC data nám dávají přehled o koncentracích plynů důležitých pro určení aktuální evapotranspirace, stanovení energetické bilance, či koloběhu uhlíku. Data se tak stávají klíčová pro sestavení a vyhodnocení hydrologických modelů, bilancí povodí, nebo například pochopení energetických toků v krajině. V této práci jsou popsány a zpracovány meteorologické veličiny potřebné pro vyhodnocení aktuální evapotranspirace a sestavení energetické bilance povrchu v softwarovém nástroji TOVI.

**Klíčová slova:** zpracování dat, meteorologická data, aktuální evapotranspirace, Eddy Covariance, energetická bilance

# **Processing of meteorological data from the Eddy Covariance station in the location of Amalie site**

## **Abstract**

Meteorological data are key to understanding the physical and ecosystem processes in the atmosphere and soil. The Eddy Covariance station is a specialized meteorological station designed for monitoring turbulent gas fluxes in the atmosphere and phenomena occurring in the intriguing interaction between the Earth's surface and the atmosphere. High-quality EC data provide us with insights into gas concentrations crucial for determining current evapotranspiration, establishing the energy balance, and understanding the carbon cycle. These data become significant for constructing and evaluating hydrological models, watershed balances or comprehending energy flows in the landscape. This study processes meteorological data required for assessing actual evapotranspiration and compiling the energy balance of the surface in the TOVI software tool.

**Keywords:** data processing, meteorological data, actual evapotranspiration, Eddy Covariance, energy balance

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>1.1 Cíle práce</b> .....	<b>- 2 -</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>- 3 -</b>
<b>2.1 Popis zájmového území</b> .....	<b>- 3 -</b>
2.1.1 Klimatické podmínky zájmového území .....	- 3 -
<b>2.2 Stanice Eddy Covariance</b> .....	<b>- 4 -</b>
2.2.1 Metoda měření Eddy Covariance.....	- 4 -
<b>2.2.1.1 Eddy Flux</b> .....	<b>- 5 -</b>
2.2.2 Výhody měření metodou EC.....	- 6 -
2.2.3 Nevýhody měření metodou EC .....	- 6 -
<b>2.3 Měření aktuální Evapotranspirace (ET<sub>a</sub>) metodou EC</b> .....	<b>- 7 -</b>
2.3.1 Evapotranspirace (ET) .....	- 7 -
2.3.1.1 Potencionální evapotranspirace (ET <sub>p</sub> ).....	- 8 -
2.3.1.2 Aktuální evapotranspirace (ET <sub>a</sub> ).....	- 8 -
2.3.2 Faktory ovlivňující ET .....	- 9 -
2.3.3 Užití metody Eddy Covariance při měření aktuální evapotranspirace. -	10 -
<b>2.4 Energetická bilance povrchu (EB)</b> .....	<b>- 11 -</b>
2.4.1 Uzavřená x otevřená energetická bilance.....	- 12 -
2.4.2 Hlavní energetické složky energetické bilance (EB) .....	- 13 -
2.4.2.1 Čisté sluneční záření (R <sub>n</sub> ).....	- 13 -
2.4.2.2 Zjevné teplo (H).....	- 14 -
2.4.2.3 Latentní teplo (LE).....	- 15 -
2.4.2.4 Tepelný tok v půdě (G).....	- 15 -
<b>2.5 Zpracování dat</b> .....	<b>- 17 -</b>
2.5.1 Kontrola kvality dat (QC) .....	- 18 -
2.5.2 Gap-filling (BMG) .....	- 19 -
2.5.3 Storage Correction (SC).....	- 20 -
2.5.4 Korekce reziduí energetické bilance (EBR).....	- 22 -
2.5.5 Průměrování veličin (AV).....	- 23 -
2.5.6 U* threshold detekce, detekce třecí rychlosti větru (MPT, CPD).....	- 23 -
<b>3 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>- 26 -</b>
<b>3.1 Vyhodnocení dat</b> .....	<b>- 26 -</b>
3.1.1 Vyhodnocení a vizualizace korekce reziduí energetické bilance (EBR)-	26 -
3.1.2 Vyhodnocení u* detekce.....	- 29 -
3.1.3 Vyhodnocení a vizualizace energetických složek.....	- 30 -
3.1.3.1 Čisté sluneční záření (R <sub>n</sub> ).....	- 30 -



3.1.3.2	Zjevné teplo (H).....	- 30 -
3.1.3.3	Latentní teplo (LE).....	- 31 -
3.1.3.4	Zásoba energie v půdě (G).....	- 31 -
3.1.4	Vyhodnocení a vizualizace Aktuální Evapotranspirace (ET) .....	- 32 -
3.1.5	Vyhodnocení a vizualizace energetické bilance (EB).....	- 33 -
<b>4</b>	<b>Diskuse.....</b>	<b>- 37 -</b>
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>- 40 -</b>

## **Seznam použité literatury a zdrojů**

## **Přílohy**

## Seznam obrázků

1. **Obrázek 1** Schéma vírů v mezní vrstvě atmosféry (Převzato: Burba, 2013).....- 5 -
2. **Obrázek 2** Schéma energetické bilance povrchu (Převzato: Burba, 2013).....- 12 -
3. **Obrázek 3** Variace komponentů slunečního záření (Převzato: Allen et al. 1998).....- 14 -
4. **Obrázek 4** Graf korekce reziduí EB a rozložení energie H a LE dle Maudera et al. (2013) .....- 26 -
5. **Obrázek 5** Scatter plot graf korekce reziduí dle Maudera et al. (2013) a vizualizace přerozdělení energie mezi H a LE .....- 26 -
6. **Obrázek 6** Graf korekce reziduí EB a rozložení energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), A - EBR-Scaled .....- 27 -
7. **Obrázek 7** Scatter plot graf korekce reziduí EB a vizualizace přerozdělené energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), A - EBR-Scaled .....- 27 -
8. **Obrázek 8** Graf korekce reziduí EB a rozložení energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), B - Direct .....- 28 -
9. **Obrázek 9** Scatter plot graf korekce reziduí EB a vizualizace přerozdělené energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), B - Direct .....- 28 -
10. **Obrázek 10** Výsledné histogramy detekce mezní třecí rychlosti pro sezonní období zima, jaro, léto, podzim. ....- 29 -
11. **Obrázek 11** Výsledný histogram detekce mezní třecí rychlosti větru pro celé sledované období, rok 2023 .....- 29 -
12. **Obrázek 12** Celoroční průběh měřené veličiny  $R_n$ .....- 30 -
13. **Obrázek 13** Celoroční průběh měřené veličiny H.....- 30 -
14. **Obrázek 14** Celoroční průběh dopočítané veličiny  $H_{average}$  po korekci reziduí EB .....- 30 -
15. **Obrázek 15** Celoroční průběh měřené veličiny LE.....- 31 -
16. **Obrázek 16** Celoroční průběh dopočítané veličiny  $LE_{average}$  po korekci reziduí EB .....- 31 -
17. **Obrázek 17** Celoroční průběh veličiny SHF .....- 31 -
18. **Obrázek 18** Celoroční průběh veličiny ET .....- 32 -
19. **Obrázek 19** Celoroční přehled všech vstupů do modelu energetické bilance povrchu:  $H_{average}$ ,  $LE_{average}$ , NETRAD\_1\_1\_1 a  $SHF_{average_1}$  .....- 33 -

20. <b>Obrázek 20</b> Vizualizace modelu energetické bilance povrchu s denní i noční složkou.....	- 33 -
21. <b>Obrázek 21</b> Vizualizace denního modelu energetické bilance povrchu .....	- 34 -
22. <b>Obrázek 22</b> Vizualizace nočního modelu energetické bilance povrchu .....	- 34 -
23. <b>Obrázek 23</b> Denní průměrné rozložení jednotlivých složek EB.....	- 36 -

## Seznam tabulek

1. <b>Tabulka 1</b> Soupis charakteristik stanice EC LIHOVAR. Informace převzaty ze softwarového nástroje TOVI LICOR. ....	- 4 -
2. <b>Tabulka 2</b> Soupis půdních veličin potřebných pro SC.....	- 21 -
3. <b>Tabulka 3</b> Nastavení softwarového nástroje TOVI pro MPT test.....	- 25 -

# 1 Úvod

V dnešní době je potřeba se soustředit na podrobnou analýzu atmosférických procesů a jejich vliv na povrch země v oblasti environmentálního výzkumu více než kdy jindy. Klíčovým nástrojem pro sledování těchto komplexních atmosférických jevů je meteorologická stanice Eddy Covariance. Metoda měření Eddy Covariance umožňuje kontinuální a přesné měření a zaznamenávání toků hmoty a energie mezi atmosférou a povrchem země, což poskytuje důležité informace o dynamice životního prostředí (Baldocchi, 2014). Tato práce se zabývá popisem a základním zpracováním dat měřené meteorologickou stanicí Eddy Covariance (EC), nacházející se v lokalitě statku Amálie ležící na Rakovnicku v Podkrušnohorské oblasti v oblasti srážkového stínu Krušných hor.

Práce je strukturována do dvou hlavních částí – teoretické a praktické.

V teoretické části je kladen důraz na popis potřebných meteorologických a hydrologických veličin, dále pak na popis významu měření evapotranspirace (ET) a sestavení energetické bilance povrchu (EB). Práce v této části poskytuje ucelený pohled na problematiku, včetně popisu klimatických podmínek lokality. Popis území a klimatických poměrů území poskytuje informace o lokalitě statku Amálie a zahrnuje relevantní faktory ovlivňující měřené procesy stanicí EC. Dále se teoretická část zabývá základním zpracováním měřených meteorologických dat, které jsou výstupem z programu na zpracování raw dat EddyPro, rovnicí energetické bilance povrchu a popisu zpracování dat, včetně kontroly kvality dat, gap-fillingu, korekce reziduí EB v softwarovém nástroji TOVI společnosti LI-COR Biosciences.

Praktická část bakalářské práce se zaměřuje na vyhodnocení vizualizovaných dat ze softwarového nástroje TOVI. Konkrétně jsou analyzovány a prezentovány hodnoty jednotlivých meteorologických veličin, jejichž výsledky mají vliv na aktuální evapotranspiraci a výsledné grafické znázornění hodnot aktuální evapotranspirace a sestavené energetické bilance povrchu země na základě zpracovaných vstupních dat. V části diskuse budou diskutovány výsledky dat a hodnocení aktuální evapotranspirace a energetické bilance povrchu.

V závěru práce je vyřešena otázka uzavření energetické bilance. Zda je EB uzavřená, či nikoli nám dává možnost nahlédnout do energetických toků a výměn v systému krajiny.

## 1.1 Cíle práce

Cíli teoretické části práce je popsat principy měření stanicí Eddy Covariance (EC) v kontextu měření atmosférických toků, zejména koncentrace plynu a turbulentních toků plynů mezi povrchem a atmosférou. Další součástí teoretické části je základní popis studovaného území včetně klimatických podmínek lokality, popis principu měření stanice Eddy Covariance, výhody a nevýhody měření touto metodou, popis meteorologických veličin, které budou využity pro sestavení aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ) a energetické bilance (EB), a to v intervalu od 1. 1. 2023 do 31. 12. 2023 za účelem získat podrobný pohled na sezónní a roční dynamiku atmosférických toků a energetické bilance v prostředí lokality statku Amálie. Data jsou zpracována v základním 30 minutovém intervalu. V praktické části práce pokračuje sestavením a vizualizací zpracovaných dat ze softwarového nástroje TOVI. Na základě těchto dat jsou prezentovány výsledky aktuální evapotranspirace, sestavené energetické bilance a hodnocení uzavření či neuzavření EB. V neposlední řadě jsou prezentovány výsledky analýz, které souvisí se zpracováním dat. Díky všem těmto výstupům poskytne tato práce celkový pohled na výměnu energie mezi povrchem a atmosférou během celého roku v lokalitě statku Amálie.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

V této kapitole je vysvětlen princip měření stanice Eddy Covariance (EC). Jsou popsány meteorologické veličiny a důvod jejich potřeby pro sestavení aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ) a energetické bilance povrchu (EB). Zprvu, zájmové území a stanice Eddy Covariance jsou popsány v částech 2.1 a 2.2. Dále je popsáno v části 2.3 užití metody EC při měření aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ). V části 2.4 je vysvětlen pojem energetická bilance povrchu (EB) a její složky použité v této analýze. Část 2.5 je zaměřena na popis zpracování dat.

### 2.1 Popis zájmového území

Studovaná lokalita Amálie se nachází v katastrálním území Ruda u Nového Strašecí v oblasti Rakovnicka, středočeský kraj, ve srážkovém stínu Krušných hor a má rozlohu cca 500 ha. Území Amálie je charakterizováno mírně zvlněným terénem s projevy zvýšené členitosti v jižní části lokality. Průměrná nadmořská výška je 410 m. n. m.

Krajina v oblasti Amálie představuje především území využívané pro zemědělskou činnost, s převládajícím zaměřením na rostlinnou výrobu. Velká část plochy v oblasti Amálie tvoří orná půda. V oblasti zemědělské činnosti se vyskytují problémy spojené s nedostatečnou zadržovací kapacitou vody v půdě (Sklenička et al., 2020)

Samotná meteorologická stanice EC se nachází v blízkosti budovy lihovaru a je obklopena ornou půdou.

#### 2.1.1 Klimatické podmínky zájmového území

Území Amálie leží dle Quittovi klimatické regionalizace (Quitt, 1971) v oblasti T2 – jaro je poměrně krátké, teplé až mírně teplé, léto je teplé, dlouhé a suché, podzim je poměrně krátký, teplý až mírně teplý, zima je krátká, suchá až velmi suchá.

- Průměrná roční teplota zde činí 8 °C.
- Celkový roční úhrn srážek se pohybuje mezi 480 a 550 mm.
- Během vegetačního období je zaznamenáván úhrn srážek ve výši 350–400 mm.

V posledních letech došlo na tomto území k častějšímu výskytu klimatických extrémů, především v podobě dlouhotrvajícího sucha a tepla (Sklenička et al., 2020).

Právě lokalita statku Amálie je pro sledování možnosti adaptace krajiny na klimatickou změnu ideální. Území se totiž nachází v oblasti srážkového stínu a je tak přírodně simulován nedostatek a špatná distribuce dešťových srážek v krajině.

## 2.2 Stanice Eddy Covariance

Stanice EC LIHOVAR, z níž jsou použita data pro tuto práci, se nachází vedle starého lihovaru, který momentálně slouží jako kravín. Stanice se skládá z kamery, vlhkoměru, radiometru, plynového analyzátoru CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O LI-7200, 3-D ultrazvukového anemometru a tři půdních čidel ve třech hloubkách.

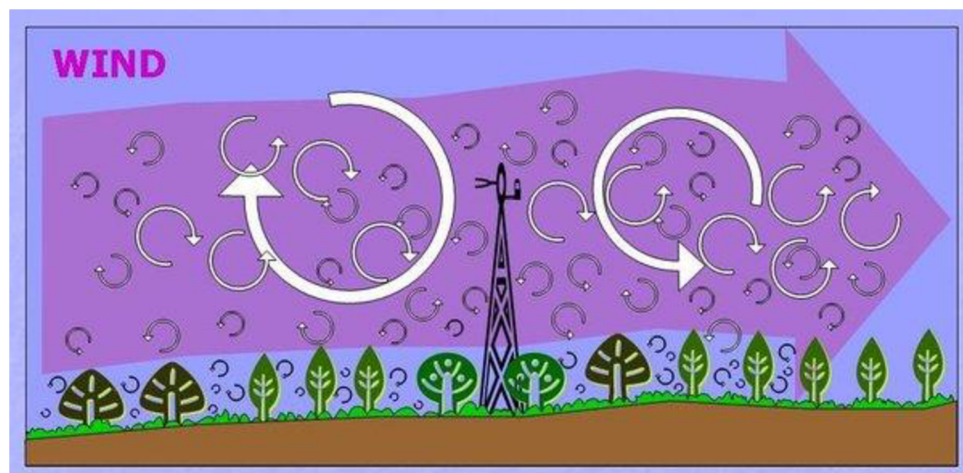
<b>INFORMACE O STANICI</b>	
Název stanice	EC LIHOVAR
Časový krok dat	30 minut
Zeměpisná šířka	50.10075378 N
Zeměpisná délka	13.8507967E
Nadmořská výška stanice	433.3 m n. m.
<b>Informace o přístrojích</b>	
Výška 3-D ultrazvukového anemometru	450 cm
Výška CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O LI-7200	420 cm
Výška vlhkoměru	340 cm
Hloubka půdních čidel 1,2,3	5 cm, 10 cm, 20 cm
<b>Charakteristika prostředí</b>	
Vegetace okolí stanice	Travní kryt, orná půda

*Tabulka 1 Soupis charakteristik stanice EC LIHOVAR. Informace převzaty ze softwarového nástroje TOVI*

### 2.2.1 Metoda měření Eddy Covariance

Princip měření Eddy Covariance (EC) spočívá v zjišťování míry vzájemné vazby (covariance) mezi koncentrací vodních pár a oxidu uhličitého s turbulentním prouděním vzduchu na hraniční vrstvě atmosféry (Gu et al., 2012; Kumar et al., 2017). Turbulentní proudění může být představeno jako malé víry (eddies), (*obr1*), (CVPK, 2020). Jedná se o statistickou metodu, která analyzuje řady vysokofrekvenčních větrných a atmosférických dat, čímž získá hodnoty toků meteorologických veličin. Metoda umožňuje měřit víry/toky CO<sub>2</sub> nad korunami stromů v korunách a kvantifikovat tak emise CO<sub>2</sub> ze stanovišť do atmosféry na místě *in situ* (Burba & Anderson, 2010). Tyto víry jsou měřeny pomocí 3-D ultrazvukového

anemometru, který měří rychlost a směr proudění s následným vyčleněním svislé složky větru. Koncentrace plynů je pak měřena optickou spektrometrií, během níž je vzduch nasáván co nejbližší anemometru do spektrometru, který určí koncentrace těchto plynů. Tento proces nasávání způsobuje pískání stanice, které je pro stanice EC typické (CVPK, 2020). Pomocí metody EC lze charakterizovat toky  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_3$  a dalších plynů. Metoda je závislá na mnoha předpokladech, které musí splňovat, na složitých výpočtech a je nejpřímějším způsobem měření toků plynů (Burba, 2022). Metoda EC má velkou řadu nesporných výhod, současně ale i nevýhod, jak je popsáno v částech 2.2.2 a 2.2.3.



Obrázek 1 Schéma virů v mezní vrstvě atmosféry (Převzato: Burba, 2013)

### 2.2.1.1 Eddy Flux

Obecným fyzikálním principem virů (fluxů) je měření, kolik molekul se v průběhu času pohybuje nahoru a dolů a jak rychle se pohybují (Kumar et al., 2017). Matematicky lze takové vertikální proudění reprezentovat jako kovarianci mezi měřením vertikální rychlosti a pohybem nahoru a dolů ve vertikálním sloupci. Taková měření vyžadují velmi sofistikované přístrojové vybavení, protože turbulentní fluktuace probíhají velmi rychle a příslušné změny koncentrace, hustoty nebo teploty jsou poměrně malé a musí být měřeny velmi rychle a velmi dobře. Stanice proto tyto víry měří až desetkrát za vteřinu. Metoda EC počítá turbulentní proudy, vertikální proudění a poskytuje téměř přímé kontinuální měření toku (Foken, 2008; Burba, 2013).



## 2.2.2 Výhody měření metodou EC

Stanice a samotná metoda Eddy Covariance má nespočet výhod. Nejdůležitější z těchto výhod jsou vypsány v následující části. Princip získávání dat má i nevýhody, které jsou popsány v části 2.2.3.

- **Vysoká frekvence měření:** Jak již bylo zmíněno, stanice EC se vyznačují vysokou frekvencí měření, až desetkrát za vteřinu, což umožňuje zachytit krátkodobé a rychle se měnící atmosférické jevy (Foken, 2008).
- **Přímé měření toků plynů:** Na rozdíl od ostatních meteorologických stanic, které měří pouze koncentrace plynů ve vzduchu, EC stanice umožňují přímé měření toků plynných látek mezi povrchem a atmosférou a dopočítávání dat na základě statistických postupů viz část zpracování dat. (Foken, 2008).
- **Přímé měření půdních parametrů:** Kromě atmosférických podmínek stanice Eddy Covariance umožňuje i přímé měření půdních parametrů – teplota, vlhkost a elektrická vodivost (Moncrieff et al., 1997)
- **Kombinace s dalšími senzory:** Stanice EC mohou být integrovány s dalšími senzory, jako jsou lidary, radary nebo spektrometry, což umožňuje ještě podrobnější a komplexnější monitorování atmosférických jevů a procesů.
- **Výzkum globální změny:** Data z EC stanic jsou důležitá pro studium dopadů klimatických změn na ekosystémy z důvodu poskytování informací o proměnlivosti toků energie a hmoty v reálném čase. Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování FŽP ČZU spolupracuje v tomto směru s Ústavem pro výzkum globální změny CzechGlobe.
- **Přenos dat na dálku:** Stanice EC bývají často automatizované a umožňují přenos dat na dálku.

## 2.2.3 Nevýhody měření metodou EC

I přesto, že stanice Eddy Covariance poskytují mnoho výhod, existují i některé nevýhody, které je třeba vzít v úvahu při používání této technologie.

- **Technická náročnost:** Stanice EC vyžadují pokročilou technickou znalost a jsou náročné na údržbu. Je nezbytné zajistit pravidelnou kalibraci a kontrolu všech senzorů, což může být finančně i časově náročné (Foken, 2008).

- **Přítomnost překážek:** Překážky jako jsou stromy, budovy nebo terénní nerovnosti, může ovlivnit měření EC stanic. Tyto překážky mohou narušovat tok vzduchu a tím i přesnost naměřených dat (Baldocchi et al., 2001).
- **Finanční náročnost:** Pořízení a údržba EC stanic může být finančně náročné, zejména pro malé výzkumné týmy.
- **Omezená pokryvnost:** Stanice pokrývají pouze omezený prostor kolem svého umístění, což může být omezením při zkoumání rozsáhlých oblastí. Pro získání reprezentativních dat může být potřeba instalovat více stanic, jako je tomu v případě lokality Amálie (Baldocchi et al., 2001; Foken, 2008).

V neposlední řadě lze mezi nevýhody zařadit ovlivnění měření v případě meteorologických extrémních jevů, jako jsou bouře, nebo silné povětrnostní podmínky. Mezi nevýhody patří také energetická náročnost EC stanic. Stanice EC LIHOVAR je statická, avšak novější stanice na lokalitě Amálie je napájena přes fotovoltaické panely a tím je umožněna její vysoká mobilita. Jsme tedy schopni stanici přemísťovat po celém studovaném území. Jak již bylo zmíněno, je však třeba dbát na terénní omezení použití stanic pro jejich ideální měření.

## 2.3 Měření aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ) metodou EC

### 2.3.1 Evapotranspirace (ET)

Evapotranspirace (ET) je ztráta vody ve formě vodní páry z povrchu planety, vodních ploch a rostlin do atmosféry (Rijtema, 1965; Bezerra, 2012). Evapotranspirace je fyzikální proces, během něhož se voda přeměňuje z kapalného nebo tuhého stavu na vodní páru. ET uvádíme v jednotkách (mm/hod). Je to klíčový proces pro začlenění vody do hydrologického cyklu. Spolu se srážkami a odtokem hraje roli v udržení hydrologické rovnováhy v krajině a spolu s odtokem a intercepcí představuje ztrátovou složku povodí. Srážky, povrchový a podpovrchový odtok do povodí tvoří příjmovou část hydrologické bilance (Tolazs, 2007; Macounová, 2009).

Celková evapotranspirace se skládá z dvou hlavních složek: fyzikálního výparu (evaporace E) a fyziologického výparu (transpirace T), (Goyal & Harmsen, 2013). Evaporace zahrnuje přemísťování vody do vzduchu z různých zdrojů, jako jsou půda, vodní plochy a dešťová voda zadržovaná na vegetaci (intercepce srážek). Na druhé straně transpirace představuje uvolňování vody z rostlin, zejména skrz listy a rostlinné dýchání. Tento proces

odkazuje na pohyb vody v rámci rostliny a související ztrátu vody ve formě výparu z průduchů na listech (UNEP & IPCC, 2007).

Odpařování vody vyžaduje relativně velké množství energie, ať už ve formě zjevného tepla ( $H$ ) nebo slunečního záření ( $R_n$ ). Proto je proces transpirace ( $T$ ) ovlivněn výměnou energie na povrchu vegetace a je omezen množstvím dostupné energie. Kvůli této omezenosti je možné předpovědět rychlost použitím principu zachování energie. Energie přicházející na povrch musí být rovna energii opouštějící povrch ve stejném časovém období (Rijtema, 1965; Allen et al. 1998).

Přesné stanovení míry evapotranspirace je velmi náročné, protože vykazuje výrazné denní a sezónní fluktuace a je ovlivněna mnoha fyzikálními faktory. Přímá měření evapotranspirace jsou kvůli specifickým podmínkám fyzikálních parametrů obtížná. Z tohoto důvodu se často používají nepřímé metody, které dokáží odhadnout evapotranspiraci na základě znalosti hydrometeorologických dat, běžně měřených na klimatických stanicích, jako je dopočet z hydrologické bilance povodí, nebo hydrologických rovnic např. Penmanovi rovnice, Penman-Monteithovi rovnice, nebo jednodušší Blaney-Criddleovi rovnice (Allen et al., 1998; Kasurinen et al., 2014). Velmi spolehlivou přímou metodou určení evapotranspirace je právě metoda EC, jež bude popsána v kapitole 2.3.3.

### **2.3.1.1 Potenciální evapotranspirace ( $ET_p$ )**

Potenciální evapotranspirace ( $ET_p$ ) reprezentuje množství evapotranspirace, které by nastalo na určeném místě s kontinuálním vegetačním krytem za podmínek neomezeného přísunu vody (Van Wijk & De Vries, 1954). Tato hodnota představuje tak maximální možný výpar a transpiraci. Závisí na několika parametrech, jako jsou sluneční záření ( $R_n$ ), tepelný tok v půdě ( $G$ ), deficit tlaku vodní páry ve vzduchu ( $VPD$ ), hustota vzduchu za konstantního tlaku, vztah tlaku nasycení vodní páry a teploty, aerodynamický odpor atd. (Allen et al., 1998; Macounová, 2009).

Průměrná roční potenciální evapotranspirace je často srovnávána s průměrným ročním úhrnem srážek ( $P$ ), protože množství energie nebývá v našich podmínkách limitujícím faktorem. Poměr těchto dvou hodnot,  $P/ET_p$ , se nazývá index sucha.

### **2.3.1.2 Aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ )**

Aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ) představuje skutečné množství vody, které se odpařuje v reálných přírodních podmínkách. Hodnota aktuální evapotranspirace závisí na potenciální evapotranspiraci ( $ET_p$ ) a dostupné vodě pro  $ET$  (Allen et al., 1998).

Detailně se aktuální evapotranspiraci věnuje kapitola 2.3.3, kde je popsána metoda Eddy Covariance (EC) při měření aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ).

### 2.3.2 Faktory ovlivňující ET

Evapotranspirace (ET) je velmi lehce ovlivnitelný meteorologický prvek. Její proměnlivost závisí na různých faktorech prostředí. Měření aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ) ovlivňují následující faktory dle Monteitha (1965) a Allena et al. (1998).

- **Teplota:** Teplota je jedním z hlavních ovlivňujících parametrů. Vyšší teploty zvyšují rychlost evaporace a transpirace. V teplejších podmínkách je více dostupné energie k dispozici pro odpařování vody.
- **Sluneční záření:** Intenzita slunečního záření ovlivňuje rychlost odpařování vody. V oblastech s vyšším slunečním zářením bývají hodnoty evapotranspirace vyšší. Jednoduše, dostupné množství energie je jedním z limitujících faktorů. Čím více sluneční energie je k dispozici, tím větší hodnota ET je dosažitelná.
- **Vlhkost vzduchu:** Velký rozdíl mezi hodnotou relativní a absolutní vlhkosti znamená vyšší míru evapotranspirace. Nižší relativní vlhkost umožňuje rychlejší výpar vody. Ve vlhkých podmínkách jsou možné nižší hodnoty ET z důvodu již velkého nasycení atmosféry vodní párou.
- **Větrné podmínky:** Pohyby větrných nasycených a nenasycených bloků vodní párou znamenají zvýšení odpařování vody z povrchu a zrychlovat transpiraci rostlin. Vlhký vzduch, který už není schopen absorpce většího množství vodní páry, může být vlivem povětrnostních podmínek přesunut a tento vzduch může být nahrazen vzduchem s nižší vlhkostí. Větrné podmínky dokáží velmi aktivně měnit mikroklima ekosystémů.
- **Dostupnost vody:** Množství vody dostupné pro evapotranspiraci je limitujícím faktorem celkového procesu. Dostupnost vody v půdě, podzemní vody nebo srážky jsou klíčovými faktory.  $ET_a$  limituje množství dostupné vody v celém hydrologickém systému.
- **Charakteristiky půdy:** Textura půdy, velikost půdních agregátů, míra utužení půdního profilu a další půdní parametry ovlivňují schopnost půdy zásobovat rostliny vodou.
- **Typ vegetace:** Různé druhy rostlin mají odlišné požadavky na vodu a mohou reagovat různě na různé půdní a hydrologické podmínky.
- **Geografické umístění:** Umístění, nadmořská výška a geografické faktory mohou ovlivňovat klimatické podmínky oblasti.

- **Úroveň pokrytí půdy:** Stav a hustota vegetačního pokryvu mohou ovlivnit množství transpirace a odpařování z povrchu.

### 2.3.3 Užití metody Eddy Covariance při měření aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ )

Metoda Eddy Covariance (EC) je jednou z neznámějších měřících technik pro odhad evapotranspirace (ET). Metoda EC odhaduje latentní (evapotranspirační) teplo (LE) na základě kovariance mezi vertikální rychlostí větru a specifickou vlhkostí. Kvalitu odhadovaného toku LE lze vyhodnotit z rovnice energetické bilance povrchu země. Metoda vodní bilance umožňuje ověření  $ET_{ec}$ . Srovnání  $ET_{ec}$  s ET odhadnutou pomocí metody vodní bilance ( $ET_{wb}$ ) umožňuje určit míru přesnosti metody EC. Metoda vodní bilance odhaduje  $ET_{wb}$  přímo z hmotnostní bilance vody a vztahuje se na daný objem půdy za určité časové období (Danager et al., 2020).

Metoda Eddy Covariance vychází z principu měření kovariance mezi rychlostí proudění vzduchu a koncentrací plynů, zejména vodní páry, v mikrometeorologickém profilu nad povrchem. Malé víry vzduchu jsou zachycovány pomocí rychlostního senzoru a analyzátoru plynů, což umožňuje přesné měření turbulentních toků a následný odhad aktuální evapotranspirace viz kapitola 2.2.1.

Měření aktuální evapotranspirace metodou Eddy Covariance a získávání tak velmi přesných meteorologických dat přináší několik výhod, které jsou nezbytné pro následující hydrologické modelování. První z výhod je fakt, že metoda EC je přímou metodou měření. Nejedná se tedy o statistický model. Stanice funguje na principu přímého a nepřerušovaného měření aktuální evapotranspirace na místě, což v ideálním případě eliminuje potřebu extrapolací a modelování (Baldocchi, 2003). Díky vysoké temporální rozlišovací schopnosti je možno měřit v krátkých časových intervalech poskytujících detailní pohled na krátkodobé změny v evapotranspiraci, což je zásadní pro porozumění dynamice vodního cyklu (Aubinet et al., 2012).

Při srovnání jiných metod určení aktuální evapotranspirace, jako například výpočet pomocí vodní bilance prostředí, metoda EC nevykazuje nižší přesnost získávání dat, naopak, jak uvádí Danager et al. (2020).

Znalost hodnot evapotranspirace je velmi důležitou součástí pro měření energetických parametrů prostředí. Proces evapotranspirace je velmi náročný na spotřebu energie. Tato energie je čerpána z okolního prostředí a má vliv na mikroklimatické podmínky v daném prostředí. Může ovlivnit teplotu vzduchu, vlhkost vzduchu a srážky, což má důležité dopady na ekosystémy, zemědělství a vodní cyklus v krajině. Evapotranspirace tvoří jeden z významných

článků v energetické bilanci zemského povrchu. Spotřeba energie při evapotranspiraci ovlivňuje její samotnou redistribuci v systému.

## 2.4 Energetická bilance povrchu (EB)

Znalost energetické bilance (energetické zásoby) daného území, její dynamiky a prostorových charakteristik má široké možnosti uplatnění, například v hydrologii, meteorologii, lesnictví nebo například v zemědělství. Kvantitativní znalost energetické bilance povrchu je zásadní pro předpověď počasí, klimatu a energetických toků v krajině. (Mauder et al., 2020).

Metoda Eddy Covariance se stala standardním nástrojem při sledování a popisu energetických cyklů povrchu země. (Sellers et al., 1995; Baldocchi et al., 2001). Jedním ze způsobů, jak ověřit toky měřené metodou EC, je sestavit energetickou bilanci území. Do této bilance počítáme dva základní prvky, a to denní a noční zásobu energie, jak je graficky znázorněno na obrázku (*obr2*). Rovnice energetické bilance tak může být vyjádřena následovně (Berkowicz & Prahm, 1982; Burba, 2013; LI-COR Biosciences):

$$R_n - G = H + LE \quad (1)$$

*Kde:*

*R<sub>n</sub>* – čisté sluneční záření ( $W/m^2$ )

*G* – energetická zásoba v půdě ( $W/m^2$ )

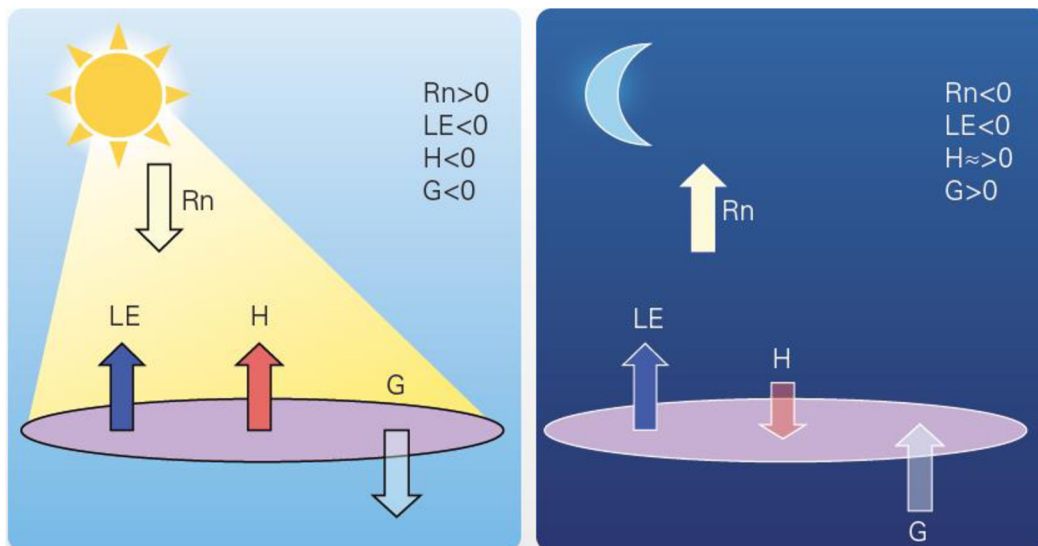
*H* – zjevné teplo ( $W/m^2$ )

*LE* – latentní teplo ( $W/m^2$ )

Tato čtyř-složková rovnice prezentuje energetickou zásobu území. Sluneční záření je měřeno radiometrem, tepelný tok v půdě je kalkulován z půdní vlhkosti a teploty v půdě měřených pomocí tří půdních čidel v lokalitě v bezprostřední blízkosti stanice EC. Složky LE a H jsou pak měřeny samotnou metodou EC. Složka *R<sub>n</sub>* dodává energii povrchu a složky *G*, *LE* a *H* odebírají a redistribují energii z povrchu (Burba, 2013).

Myšlenka ověřování energetického bilance je jednoduchá: Pokud se všechny klíčové složky sečtou na nulu, jak vyžaduje zákon zachování energie, pak jsou všechny přenosy energie úspěšně zohledněny a tepelné toky *LE* a *H* byly metodou EC měřeny správně. Jestliže byly tyto posledně zmíněné veličiny správně změřeny pomocí metody EC, pravděpodobně byly také správně změřeny toky  $CO_2$  a koncentrace dalších stopových plynů. Fakt, že energetický bilance

je uzavřena na nulu nezbytně neznamená kvalitní a správné měření toků stopových plynů a ostatních meteorologických veličin, zatímco neuzavřená energetická bilance téměř jistě signalizuje problém při měření toků meteorologických veličin (Burba, 2013).



Obrázek 2 Schéma energetické bilance povrchu (Převzato: Burba, 2013)

#### 2.4.1 Uzavřená x otevřená energetická bilance

Otevřená energetická bilance se vztahuje k systému, kde je možné vnější energie přenášet dovnitř nebo ven. V atmosféře je to patrné především při interakci se Sluncem, které dodává energii pomocí slunečního záření ( $R_n$ ). Tato energie proniká atmosférou a je absorbována nebo odražena zpět do vesmíru. Podobně může docházet k výměně energie s okolním prostředím, například při výparu vody z oceánů nebo při uvolňování tepla z pevninských ploch. Na rozdíl od otevřené bilance je uzavřená bilance charakterizována jako systém, ve kterém nedochází k žádnému vstupu nebo výstupu energie (Franssen et al., 2010). To znamená, že veškerá energie v systému zůstává konstantní. Jak říká zákon zachování energie, množství energie je konstantní, lze pouze měnit formu této energie. Uzavřená energetická bilance představuje koncept, který je základem pro porozumění dlouhodobých energetických trendů v atmosféře a na zemském povrchu. V tomto typu bilance není žádný vstup nebo výstup energie z daného systému, což znamená, že celková energie v systému zůstává konstantní. Tento koncept je důležitý například při studiu dlouhodobých klimatických trendů, kde je sledována celková energie zachycená v atmosféře a na zemském povrchu.

V zásadě lze říci, že pakliže veškeré energetické vstupy a výstupy jsou rovny nule, jedná se o uzavřený systém zásoby energie. V opačném případě, kdy převažují vstupy, nebo výstupy

energie, lze tento systém považovat za otevřený. Je zřejmé, že energetickou bilanci na zemském povrchu nelze uzavřít pomocí experimentálních dat. Bylo zjištěno, že dostupná energie, tedy součet čistého záření ( $R_n$ ) a tepelného toku v půdě ( $G$ ), je ve většině případů větší než součet turbulentních toků zjevného ( $H$ ) a latentního tepla ( $LE$ ), (Foken, 2008b).

#### **2.4.2 Hlavní energetické složky energetické bilance (EB)**

V následujících podkapitolách jsou detailněji popsány energetické složky bilance povrchu (EB). Podkapitoly se věnují čistému slunečnímu záření ( $R_n$ ), zjevnému teplu ( $H$ ), latentnímu teplu ( $LE$ ) a celkové energetické zásobě v půdě ( $G$ ).

##### **2.4.2.1 Čisté sluneční záření ( $R_n$ )**

Čisté sluneční záření ( $R_n$ ) představuje klíčový prvek energetické bilance povrchu Země. Tato složka zahrnuje příjem a ztrátu energie v podobě elektromagnetického záření (Allen et al. 1998). Čisté sluneční záření představuje rozdíl mezi příjmem a odevzdáním elektromagnetického záření na povrchu Země. Je to prvek energetické bilance, který ovlivňuje teplotu, evapotranspiraci, a další procesy na povrchu. Příjem  $R_n$  zahrnuje sluneční záření a infračervené záření z atmosféry, zatímco odevzdání se skládá z infračerveného záření emitovaného povrchem zpět do atmosféry (Allen et al., 1998).

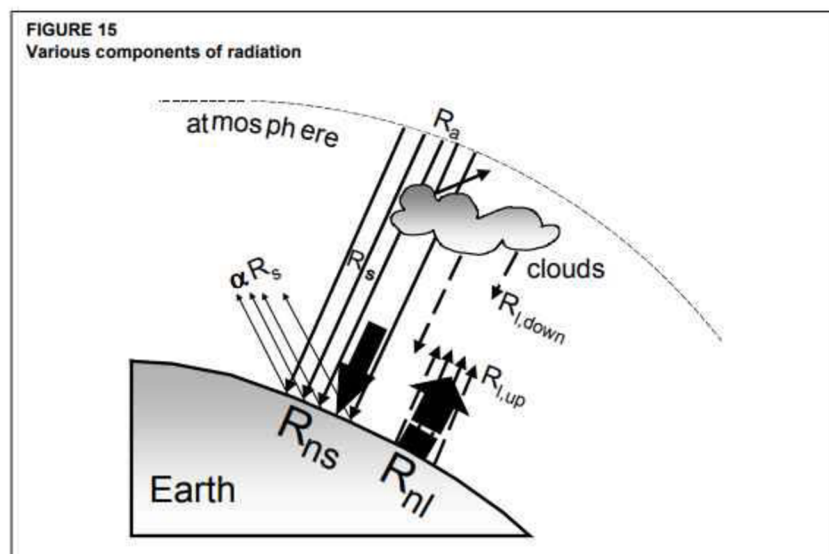
Čisté záření ( $R_n$ ) je rozdíl mezi příchozím a odcházejícím krátkovlnným i dlouhovlnným zářením. Jedná se o rovnováhu mezi energií absorbovanou, odraženou a vyzařovanou povrchem Země, nebo o rozdíl mezi čistým příchozím krátkovlnným zářením a čistým odchozím dlouhovlnným zářením (*obr3*), (Allen et al., 1998).

Měření slunečního záření je nezbytné pro porozumění energetické bilance. Pro tyto účely jsou využívány radiometrické metody, které zahrnují použití pyranometrů pro měření slunečního záření a pyrgeometrů pro měření infračerveného záření.

Čisté záření ( $R_n$ ) má klíčový vliv na povrchové procesy. Ovlivňuje faktory jako například ohřev povrchu, kde sluneční záření představuje hlavní zdroj tepla, který ovlivňuje teplotu povrchu. Příjem sluneční energie podporuje proces odpařování vody z povrchu do atmosféry.  $R_n$  ovlivňuje fotosyntézu a transpiraci rostlin, což má vliv na vegetační růst a aktuální evapotranspiraci ( $ET_a$ ), (Allen et al., 1998).

$R_n$  je obvykle kladné během dne a záporné v noci. Celková denní hodnota je téměř vždy kladná po dobu 24 hodin, s výjimkou extrémních podmínek na vysokých zeměpisných šířkách.  $R_n$  je jedním ze čtyř vstupů, které budou použity pro vymodelování energetické bilance (EB) lokality statku Amálie v kapitole 3.1.3.





Obrázek 3 Variace komponentů slunečního záření (Převzato: Allen et al., 1998)

#### 2.4.2.2 Zjevné teplo (H)

Zjevné (citelné) teplo (H) představuje složku energetické bilance povrchu Země, která zohledňuje přenos tepla vzduchem a půdou (Ackerman, 2011). Zjevné, nebo také sensitivní teplo (H) je termín používaný k popisu přenosu tepla vzduchem a půdou v důsledku teplotních rozdílů. H je základním článkem principů konvekce a kondukce v atmosféře. Tyto děje popisují pohyb tepelné energie atmosférou. Fyzikálně lze zjevné teplo definovat jako množství tepla, které je přeneseno vzduchem na jednotkovou plochu za jednotkový čas při určité teplotní změně (Monteith, 1965).

Zjevné teplo má v energetické bilanci povrchu Země významnou roli. Představuje měřítko energetického toku spojeného s teplotními gradienty v atmosféře a na povrchu půdy. Během dne převažuje přenos tepla od vyhřátého povrchu do atmosféry, zatímco v noci může dojít k reverznímu toku tepla z atmosféry na povrch. Měření zjevného tepla je prováděno prostřednictvím meteorologických *in-situ* metod, v našem případě, stejně jako latentní teplo (LE), je měřeno meteorologickou stanicí, metodou EC. Princip vychází z měření teplotních gradientů a rychlosti proudění vzduchu viz kapitola 2.2.1. V horkých dnech je tento transport tepla atmosférou zodpovědný za vznik tepelných ostrovů, nejčastěji v rozhraní mezi městem a okolní krajinou. V lokalitách jako Amálie tedy mohou být měřeny velmi rozdílné hodnoty než v nejbližších hustěji zastavěných oblastech. Zjevné teplo (H) hraje klíčovou roli při formování klimatických extrémů, jako jsou horka či chladné vlny. V období extrémních teplotních

podmínek dochází k výraznému zvýšení nebo snížení tohoto tepla. Právě studium této složky energetické bilance je významné pro lepší pochopení a adaptaci na klimatické extrémny (Allen et al., 1998).

#### **2.4.2.3 Latentní teplo (LE)**

Latentní či evapotranspirační teplo (LE) vyjadřuje energii potřebnou k přeměně jednotkové hmotnosti vody z kapalného stavu na vodní páru při stálém tlaku a konstantní teplotě (Allen et al., 1998; Burba, 2020). Hodnota latentního tepla se mění v závislosti na teplotě. Při vysoké teplotě bude potřebováno méně energie než při nižších teplotách. Protože LE se při normálních teplotních změnách změní jen málo, je ve zjednodušené verzi výpočtů použita jedna hodnota 2,45 MJ/kg. Tato hodnota reprezentuje latentní teplo při teplotě vzduchu kolem 20 °C. Konkrétně se jedná o teplo, které je absorbováno nebo uvolňováno během procesů odpařování, transpirace rostlin, nebo sublimace. Při odpařování vody z povrchu se spotřebovává latentní teplo, což má ochlazující účinek. Naopak, při opačném procesu kondenzace vodní páry se uvolňuje latentní teplo, které přispívá k oteplování okolí (Hartmann, 2015).

Latentní teplo má zásadní vliv na ekosystémy, zejména na rostlinnou transpiraci. Procesy spojené s latentním teplem ovlivňují růst rostlin, vodní dostupnost a mikroklima v daném prostředí. Na lokalitě statku Amálie je latentní teplo (LE) společně se zjevným teplem (H) měřeno pomocí metody EC přístrojem LI-7200 společnosti LICOR Biosciences.

#### **2.4.2.4 Tepelný tok v půdě (G)**

Při odhadu evapotranspirace (ET) je třeba zvážit všechny členy energetické bilance (rovnice 1). Půdní tepelný tok (G) je energie, která je využita k ohřevu půdy. Skládá se z hodnot toku tepla v půdě (SHF) a tepelné zásoby v půdě (SHS). SHF a SHS představují složky energetické bilance povrchu. Tepelný tok půdy označuje tok tepla proudícího skrze půdu. Tento tok je důležitým faktorem ovlivňujícím teplotu a půdy a přenos tepla v půdě (Allen et al., 1998). V situacích, kdy je půda ohřívána slunečním zářením, je půdní tepelný tok kladný, což naznačuje přenos tepla z půdy do okolí. Naopak, pokud je půda ochlazována, je půdní tepelný tok záporný, což signalizuje přenos tepla z okolního prostředí do půdy. Jednoduše, když je půdní povrch ohříván, předává tuto energii zpět atmosféře. Když je půdní povrch chladný, ochlazuje i mezní vrstvu atmosféry nad povrchem. Tento meteorologický fakt je velmi důležitý pro vznik různých meteorologických jevů. Množství energie potřebné pro tento proces je odečteno od  $R_n$  při odhadu evapotranspirace.

I když je půdní tepelný tok malý ve srovnání s čistým slunečním zářením ( $R_n$ ) a často bývá, či může být ignorován, množství energie získané nebo ztracené půdou v tomto procesu by teoreticky mělo být odečteno nebo přidáno k  $R_n$  při odhadu ET. Při výpočtech se často teplota půdy zjednodušeně modeluje jako  $T_s = T_a$ , kde  $T_s$  je teplota půdy a  $T_a$  teplota vzduchu.

Tepelná zásoba v půdě se týká schopnosti půdy uchovávat teplo z předchozích období energetického příjmu. Tyto tepelné zásoby mohou být významné zejména při dlouhodobých analýzách, kde se zohledňuje akumulace tepla v půdě a její vliv na mikroklima a hydrologické procesy. Při dlouhodobém sledování může tepelná zásoba půdy ovlivnit teplotní režim půdy a její schopnost absorbovat a udržovat vlhkost (Shuttleworth, 1985; Allen et al., 1998).

Vzhledem k tomu, že tepelný tok půdy a tepelné zásoby půdy jsou důležitými faktory ovlivňujícími energetickou bilanci povrchu a jsou nezbytné pro její uzavření, budou pro modelování EB v této práci využity data ze všech tří půdních čidel dostupných v místě měření.

## 2.5 Zpracování dat

Samotnému zpracování dat v softwarovém nástroji TOVI předchází zpracování dat stáhnutých přímo ze stanice, v programu EddyPro. Tento program vytvoří datasety potřebné k nahrání do TOVI. Z EddyPro jsou také exportována metadata důležitá pro následné zpracování dat v TOVI.

Zpracování dat měřených metodou Eddy Covariance (EC) pomocí softwaru TOVI se skládá z několika částí a určitého pracovního postupu tak, aby byl výsledný soubor dat co nejkvalitnější. Dodržení pracovního postupu a správného nastavení poloautomatických analýz v TOVI je pro správnost výsledků klíčové. Pracovní postup se skládá z částí: kontrola kvality dat (QC), gap-fillingu (BMG), korekce zásoby (SC), korekce reziduí energetické bilance (EBR), průměrování meteorologických veličin (AV),  $u^*$  threshold detekce a samotného nástroje pro sestavení energetické bilance. Kontrola kvality (QC) identifikuje a odstraňuje data nízké kvality. QC se provádí nejen po importu dat, ale může být aplikována v libovolné fázi zpracování. TOVI nabízí nástroje pro poloautomatické a ruční odstranění nekvalitních dat. Gap-filling (BMG) slouží ke sloučení dvou stejných veličin do jedné nové proměnné, čímž vytvoří souvislou vyplněnou časovou řadu. Jako zdroj externích dat pro gap-filling dat stanice EC LIHOVAR jsou využívány 4 ISD stanice (Integrated surface database stations): ISD stanice Ruzyně, ISD Milešovka, ISD Doksany a ISD Plzeň-Mikulka. Korekce zásoby (SC) se používá po dokončení QC a BMG. Zaznamenává tok v určité výšce měření a bere v úvahu hromadění nebo úbytek plynů v atmosféře pod touto výškou. Korekce reziduí energetické bilance (EBR) koriguje zjevný (H) a latentní (LE) tepelný tok zavedením uzávěru povrchové energetické bilance. Pro korekci reziduí jsou dostupné čtyři metody, které jsou rozepsány v kapitole o korekci reziduí. Průměrování veličin (AV) zprůměruje více veličin pro danou lokalitu do výsledné jedné nové veličiny. Tento nástroj je využit pro zásobu energie v půdě. Na lokalitě Amálie jsou v blízkosti stanice EC LIHOVAR dostupná tři půdní čidla.  $u^*$  threshold detekce (MPT, CPD) najde hraniční hodnotu rychlosti toků, při které již nejsou závislé na rychlosti tření. TOVI nabízí dva různé přístupy: moving point test (MPT) a metodu change point detection (CPD). Po  $u^*$  threshold detekci je provedena opět kontrola kvality (QC). Zpracování dat v softwarovém nástroji TOVI je detailně popsáno v následujících kapitolách.

Veškerý popis pracovních postupů je popsán z příručky pro zpracování dat v softwarovém nástroji TOVI (LI-COR Biosciences, 2021).

### 2.5.1 Kontrola kvality dat (QC)

Datasey naměřené metodou Eddy Covariance (EC) obvykle obsahují některá data nízké kvality, která musí být eliminována z další analýzy. V případě, že tato data nebudou vyřazena z následných datových analýz, může mít za následek značné zkreslení výsledků. Nástroj pro kontrolu kvality (QC) softwarového nástroje TOVI se používá k prozkoumání dat, filtrování hodnot nízké kvality a potenciálně špatně měřených dat, jak bude vysvětleno později v této kapitole.

Je třeba poznamenat, že QC neprovádíme pouze po importu vstupních dat, ale QC může být nutné znovu provést v libovolném bodě následných zpracovatelských fází. Existují dva důvody (Issac, 2017). Zaprvé, následné zpracování může vytvořit špatná data, jako jsou extrémní hodnoty. Často to totiž znamená chybné měření přístroje nebo čidla. Zadruhé, jakýkoli gap-filling, který zahrnuje statistickou transformaci dat, je náchylný k nekvalitním datům ve zpracovávaném datovém souboru. To znamená, že data považovaná za hraničně kvalitní během úvodní fáze zpracování se mohou objevit jako nekvalitní v pozdějších fázích zpracování.

Data se špatnou kvalitou se mohou projevit různými způsoby, a existuje mnoho možných příčin. Obecně platí, že neexistuje žádná jednotná kontrola, která by mohla identifikovat nekvalitní data, žádný jednotný test, který by mohl být aplikován k odstranění všech nekvalitních dat, a žádný spolehlivý způsob, jak odstranit všechna nekvalitní data a nechat pouze ta kvalitní. Často je rozdíl mezi kvalitními a nekvalitními daty velmi malý. Avšak účinné využití procesu QC minimalizuje zahrnutí kvalitativně špatných dat do procesu analýz a maximalizuje užití kvalitních dat.

Softwarový nástroj TOVI nabízí několik způsobů, jak si poradit s těmito omezeními, včetně několika obecných nástrojů pro poloautomatické odstranění nekvalitních dat hromadně a nástroje pro ruční odstranění nekvalitních dat, která zůstanou po použití poloautomatických postupů. Pro potřeby této práce a zpracování dat potřebných pro výsledky v této práci byly provedeny následující kroky QC:

**Separace nekvalitních dat na základě určení minima a maxima meteorologických veličin:** Tato poloautomatická část QC funguje na principu reálnosti některých meteorologických veličin. Mnoho proměnných v datech EC má dobře definované rozsahy pro pravděpodobné hodnoty. Například přichodí sluneční záření ( $R_n$ ) zřídka překročí solární konstantu (konstantu nelze definovat jednotným číslem, ale hodnoty se pohybují kolem hodnoty  $1356 \text{ W/m}^2$ ). Globálně můžeme tvrdit, že maximální možné hodnoty pro veličinu sluneční záření ( $R_n$ ) jsou do  $1500 \text{ W/m}^2$ . Pro větší přesnost jsou vzaty mnohem užší rozsahy

lokálně v závislosti na zeměpisné šířce EC stanice. Na tomto principu jsme schopni separovat nekvalitní data u velkého množství meteorologických veličin.

**Separace nepravděpodobných hodnot pomocí metadat z EddyPro:** Na základě kvalitativních informací poskytovaných softwarem EddyPro při jejich importu do TOVI jsme schopni vymeziť další část nekvalitních dat. Tento proces funguje na principu tzv. Fokenových testů, které testují datové sety EC na dobře vyvinuté podmínky turbulence (Issac, 2007). Data jsou pak rozdělena do tří tříd kvality. Třída 2 jsou data nekvalitní a doporučuje se jejich vyřazení z analýz. Třída 1 jsou data průměrné kvality, kde se doporučuje jejich úprava před užitím v analýzách. Třída 0 jsou data vyhovující a není třeba jejich úpravy před použitím.

Výše uvedené poloautomatické metody separace nekvalitních dat nemusejí být vždy dostatečné. Ačkoli v našem případě byl původní dataset ze stanice EC LIHOVAR pro období 1. 1. 2023 až 31. 12. 2023 velmi kvalitní v základu, a nebylo nutné ruční separace dat, je zde uvedeno, jak v případě nekvalitního datasetu postupovat:

**Vyloučení dat a časů:** V případě očividné chyby datasetu TOVI umožňuje ruční odstranění všech dat mezi počátečním datem a časem a koncovým datem a časem. Jednotlivé body dat mohou být vyloučeny specifikací rozsahu data a času se stejnými počátečními a koncovými hodnotami. Zjevně chybná data tak můžeme odstranit a v nástroji pro gap-filling je můžeme nahradit daty z jedné, či více ISD stanic.

V poslední řadě je potřeba myslet na fakt, že je třeba vyvážit užití poloautomatických a ručních metod QC. Větší spoléhání na poloautomatické metody sniží čas potřebný k analýze, ale může zvýšit podíl separovaných kvalitních dat za účelem dosažení uspokojivé míry vyseparovaných nekvalitních dat. Větší spoléhání na ruční metody zvýší čas potřebný k analýze, ale může snížit podíl separovaných kvalitních dat při dosažení uspokojivé míry separace nekvalitních dat.

### 2.5.2 Gap-filling (BMG)

Nástroj Biomet Merge & Gap Fill (BMG) umožňuje sloučit dvě stejné veličiny do jedné nové proměnné a tím vytvořit souvislou vyplněnou časovou řadu. BMG slouží k spojení těchto datových zdrojů do jedné sloučené nebo gap-fillované časové řady s kompletnějším souborem dat, čímž vytvoří novou kombinovanou proměnnou. Gap-filling představuje komplexní proces, který se zabývá identifikací a následným doplňováním chybějících hodnot v meteorologických datech metodou Eddy Covariance (EC). Tento postup je nezbytný pro zajištění konzistence a úplnosti datových sad.

Gap-filling se často provádí v situacích, kdy dochází k technickým problémům s měřicím zařízením, nebo kdy jsou data získávána v neideálních podmínkách, jako jsou například atmosférické podmínky nebo interference způsobená okolní vegetací. Cílem gap-fillingu je minimalizovat vliv chybějících dat na výsledky analýz, a tím zajistit spolehlivé a přesné výsledky.

Pro BMG je možné využít stáhnuté externí datasey. Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, pro gap-filling dat stanice EC LIHOVAR jsou využívány celkem 4 datové zdroje, a to ISD stanice Ruzyně, ISD Milešovka, ISD Doksany a ISD Plzeň-Mikulka. Z dřívějších analýz provedených v TOVI bylo zjištěno, že největší shoda dat je s ISD stanicí Ruzyně. Při analýzách a gap-fillingu v této práci budou užity data primárně z ISD Ruzyně, sekundárně z ostatních ISD stanic.

Po nahrání dat do BMG je vybrána primární veličina, u které se nachází mezery v měření z důvodu například nefunkčnosti čidla, či meteorologického extrému, nebo úmyslnému odstranění dat při QC označených jako nekvalitní/nevyhovující pro další analýzy. Proběhne nastavení časového intervalu, ve kterém chceme, aby se data vyplnila, a stanoví se minimální požadovaný překryv dat (%). Minimální požadovaný překryv je prahová hodnota, která popisuje procentuální překrývání se proměnných v primární proměnné a proměnné, která má být sloučena. Pokud není nastavený žádný překryv, TOVI není schopen vypočítat statistiky obou proměnných. Výchozí nastavení je tedy 50 %, pro potřebu této práce byl překryv upraven na 30 % z důvodu vysoké kvality vstupních dat, a proto není třeba kvalitní reálná data doplňovat potencionálně méně kvalitními daty z ostatních čidel, nebo ISD stanic.

### **2.5.3 Storage Correction (SC)**

Korekce zásoby (storage correction, SC) se používají po dokončení prvního screeningu kvality (QC) a gap-fillingu (BMG). Přístroje měřící metodou Eddy Covariance zaznamenávají tok v určité výšce měření. Pod touto výškou může docházet k hromadění nebo úbytku plynů v atmosféře, zejména v klidných obdobích nebo ve vysokých korunách stromů, například hromadění CO<sub>2</sub> v korunách během klidné noci nebo úbytek CO<sub>2</sub> během klidného dne. V závislosti na koruně stromu a terénu mohou poryvy větru velmi rychle přesunout nahromaděný CO<sub>2</sub> do strany pod věž nebo horní část věže s přístroji. Za těchto okolností je tok plynů buď nezjištěn, nebo zjištěn jen částečně, zejména ve vysokých korunách nebo ve složitém terénu (Burba, 2013).

Na rovném terénu a dobrým turbulentním prouděním jsou tyto procesy buď malé, nebo se nakonec dlouhodobě vyrovnají, ale přesto mohou mít významný vliv na hodinové intervaly měření. Proto musí být kladen velký důraz při výběru umístění stanice. Měření profilu koncentrace plynu umožňuje odhalit většinu těchto nárůstů tím, že poskytuje údaje pro výpočet termínu ukládání toku plynu pod výškou měření.

Akumulační míra se ve skutečnosti vypočítá z časových změn v integrovaném profilu koncentrace plynu a přičte se k EC tokům, čímž se získá výsledná hodnota toku. Profil koncentrace plynu se obvykle měří pomalou rychlostí v několika výškách (z) nad povrchem půdy a pod výškou EC přístroje. Z tohoto profilu se vypočítá zásoba toku za určitý časový interval, v tomto případě půlhodinový.

Výpočty zásob jsou důležité zejména za slabého větru, při stabilní stratifikaci, ve vysokých korunách stromů nebo v případech, kdy je výrazně omezeno promíchávání vzduchu. V tomto případě by se mohlo větší množství například CO<sub>2</sub> z nejbližšího lesního porostu přesunout přímo nad stanicí a chvilkově tak negativně ovlivnit měření. Výpočty zásob nejsou měřením turbulentních toků, ale jsou důležité pro konečné hodnoty toků, zejména pokud jsou předmětem studie čisté výměny plynů ekosystémů (Burba, 2013).

Korekce zásoby (SC) vyžaduje údaje, které nemusí být obsaženy v původním souboru dat, včetně informací o půdě a poloze čidel tepelného toku půdy, teploty půdy a vlhkosti půdy (SHF, TS, SWC). Tyto metadata potřebná k provedení SC byly doplněny. Výšky přístrojů byly měřeny ručně, hloubky půdních čidel jsou 5 cm, 10 cm a 20 cm. Informace o půdě byly převzaty od České geologické služby (užitím pedologických map 1:50000). Informace potřebné k provedení SC jsou uvedeny v následující tabulce.

<i>VELIČINA PŮDNÍHO ČIDLA</i>	<i>HLOUBKA (CM)</i>
<b>SHF_1_1_1 (tepelný tok v půdě)</b>	<b>5</b>
<b>SHF_2_1_1</b>	<b>10</b>
<b>SHF_3_1_1</b>	<b>20</b>
<b>TS_1_1_1 (teplota půdy)</b>	<b>5</b>
<b>TS_2_1_1</b>	<b>10</b>
<b>TS_3_1_1</b>	<b>20</b>
<b>SWC_1_1_1 (vlhkost půdy)</b>	<b>5</b>
<b>SWC_2_1_1</b>	<b>10</b>
<b>SWC_3_1_1</b>	<b>20</b>
<b>Půdní typ</b>	<b>Luvizem modální (LUm)</b>

*Tabulka 2 Soupis půdních veličin potřebných pro SC*



#### 2.5.4 Korekce reziduí energetické bilance (EBR)

Energetická bilance povrchu, jak již bylo výše popsáno, je několika-složková rovnice příjmů a výdajů energie povrchem (*rovnice 1*), kde členy na levé straně jsou energie ( $R_n - G$ ) dostupná v každém daném okamžiku na rozhraní mezi zemským povrchem a atmosférou, popsaná jako čisté sluneční záření ( $R_n$ ,  $W/m^2$ ) dopadající na povrch minus energie opouštějící povrch prostřednictvím půdy ( $G$ ,  $W/m^2$ ). Pravá strana popisuje energii opouštějící povrch směrem do atmosféry, vyjádřenou jako zjevný tepelný tok ( $H$ ,  $W/m^2$ ) a latentní tepelný tok ( $LE$ ,  $W/m^2$ ). Úplnější formulace může zahrnovat termíny (které jsou obecně považovány za podružné), jako je teplo uložené v korunách stromů a porostech, energie použitá pro fotosyntézu atd. (LICOR Biosciences).

Neuzavření energetické bilance je často pozorovaným jevem hydrometeorologických terénních měření při použití metody Eddy Covariance, což lze přičíst podhodnocení turbulentních toků zjevného ( $H$ ) a latentního ( $LE$ ) tepla (Mauder et al., 2018). Metody úprav dostupné v softwaru TOVI se snaží korigovat  $H$  a  $LE$  toky zavedením uzávěru povrchové energetické bilance. Pro korekci reziduí jsou dostupné čtyři metody, a to metoda dle Maudera et al. (2013), Charuchittipana et al. (2014), která je momentálně nedostupná a autoři pracují na jejím opravení, a dvě metody dle De Rooa et al. (2018), a to metoda A – EBR-Scaled a metoda B – Direct. Tyto metody se liší v zásadě dvěma hlavními aspekty. Prvním je časové měřítko, ve kterém je vynuceno uzavření energetické bilance a druhým je způsob rozdělení zbytkové energie mezi 30 minutové hodnoty  $H$  a  $LE$  dle zachování Bowenova poměru či nikoli.

Metoda Maudera et al. (2013) vynucuje korekci v denním časovém měřítku a odděluje zbytkovou energii tak, aby byl zachován Bowenův poměr ( $H/LE$ ) před a po korekci na intervalu 30 minut.

Metoda Charuchittipan et al. (2014) vynucuje korekci na 30 minutové bázi a připisuje větší část zbytkové energie  $H$ , a proto výrazně zvyšuje Bowenův poměr pro většinu období.

De Roo et al. (2018) navrhuje dvě metody: A – EBR-Scaled a B – Direct. U obou metod se rozdělení mezi  $H$  a  $LE$  mění s výškou měření a připisuje větší část energie  $H$  vzhledem k  $LE$ , než by platilo za Bowenova poměru, ale ne tak velkou mírou jako metoda Charuchittipan et al. (2014). Obě metody se liší tím, že jedna je odvozena čistě bez zohlednění pozorovaného neuzavření, zatímco druhá je omezena neuzavřením vyhodnoceným na denní bázi.

Jak již bylo zmíněno, při měření metodou EC se povede velmi zřídka uzavření energetické bilance. Jednou z nejvíce akreditovaných hypotéz je, že z větší části je nedostatečná uzavřenost způsobena systematickým podhodnocením  $H$  a  $LE$  v souvislosti s transportními

jevy, které nejsou zachyceny systémy Eddy Covariance. Na základě tohoto předpokladu bylo v posledních několika letech navrženo několik metod pro korekci měření H a LE odvozených z EC, aby bylo dosaženo uzavření energetické bilance.

Většina navržených metod se při výpočtu korekčních faktorů spoléhá na energetickou nerovnováhu, a proto často dosahují dokonalého uzavření. V minulosti byly navrženy korekční metody, které nespoléhají na energetickou nerovnováhu a které jsou i v současné době aktivně vyvíjeny. Mauder et al. (2013) používají zbytky energetické bilance vyhodnocené na denní bázi a rozdělují tuto energii mezi H a LE způsobem, který zachovává Bowenův poměr (H/LE).

Problematika korekce reziduí energetické bilance (EBR) je velmi komplexní. Pro potřeby této práce je pouze vysvětlen základní princip čtyř dostupných metod. V softwarovém nástroji TOVI jsou využity pro korekci reziduí všechny funkční metody a jejich výsledky a vizualizace prezentovány v kapitole 3.1.1.

### **2.5.5 Průměrování veličin (AV)**

Průměrování meteorologických veličin (AV) zprůměruje více měření veličiny pro danou lokalitu. Je-li k dispozici více čidel, které měří stejnou veličinu, je možnost tyto veličiny zprůměrovat do jedné výsledné. Na lokalitě Amálie jsou v blízkosti stanice EC LIHOVAR tři půdní čidla. Tímto nástrojem je provedeno sjednocení informací o toku a zásoby energie v půdě (G) ze všech tří čidel, pro následující dosazení do energetické bilance. Následně bylo AV použito pro zprůměrování hodnot H a LE po korekci reziduí energetické bilance, a to konkrétně pro spojení měřených hodnot H a LE a hodnot, které byly výstupy po korekci reziduí EB. V kapitole výsledky jsou prezentovány grafy H a LE a následně upravené grafy po započítání změn po korekci reziduí H\_average a LE\_average. U zásoby energie v půdě (G) je prezentován výsledný graf SHF\_average\_1 spojením tří hodnot veličin SHF\_1\_1\_1, SHF\_2\_1\_1, a SHF\_3\_1\_1.

### **2.5.6 U\* threshold detekce, detekce třecí rychlosti větru (MPT, CPD)**

U\* threshold detekce (detekce třecí rychlosti větru) je způsob, jak najít hraniční hodnotu rychlosti toků veličin, při které již nejsou závislé na rychlosti tření. Třecí rychlost větru ovlivňuje transport vzduchu, který nese hmotu a energii mezi povrchem a atmosférou. Vyšší třecí rychlost znamená větší turbulenci a efektivnější výměnu hmoty a energie mezi dvěma médii. TOVI nabízí dva různé přístupy: moving point test (MPT) a metodu change point detection (CPD). Tento nástroj se používá po dokončení první části kontroly kvality (QC), gap-fillingu (BMG), průměrování veličin (AV) a korekcí zásob (SC). MPT a CPD fungují na

principu statistické metody bootstrappingu. Níže jsou popsány koncepty a principy použité v postupu  $u^*$  threshold detekce.

Bootstrapping je statistická technika pro hodnocení některých vlastností statistických odhadů. Umožňuje například vyhodnotit spolehlivost střední hodnoty odhadu. Jedná se o proces opakovaného výběru ze vzorku  $M$ , který umožní získat  $M$  hodnot střední hodnoty, které se použijí k sestavení rozdělení středních hodnot, a tím získat vlastnosti, jako je standardní chyba, interval spolehlivosti a další.

Softwarový nástroj TOVI pomocí bootstrappingu Mkrát převzorkuje roční data, zopakuje celý moving point test (MPT) a připraví  $M$  různých prahových hodnot, což umožňuje sestavit rozdělení prahových hodnot  $u^*$  a z něj odvodit konečnou hodnotu jako medián tohoto rozdělení, protože MPT zahrnuje výpočet prahových hodnot pro každou sezónu nezávisle na sobě, jedním z mezivýsledků jsou čtyři rozdělení prahových hodnot  $u^*$  (jedno pro každou sezónu), která jsou vynesena v histogramech, viz kapitola 3, výsledky. Počet bootstrapů je automaticky nastaven na univerzální hodnotu 100. Tato hodnota byla určena na základě několika měření a stanovena jako univerzální (AmeriFLUX). Ovšem v našem případě máme k dispozici velké množství dat a hodnota byla postupně upravována do doby, než byly rozdíly ve výsledku minimální na hodnotu 40. Data použitá k sestavení konečného histogramu se získají tak, že se v každé iteraci bootstrapu vezme maximum čtyř sezónních prahových hodnot, čímž se získá  $M$  hodnot  $u^*$ , z nichž se sestaví konečný histogram a odvodí konečná prahová hodnota  $u^*$ .

Z nutnosti rozdělení dat do teplotních tříd a tříd  $u^*$  se analýza provádí podle ročních období, protože respirace závisí na teplotě v různých ročních obdobích různým způsobem (v závislosti na dalších vlastnostech, jako je vlhkost, obsah organických látek v půdě apod.). Čím více dat je k dispozici, ideálně celý rok rozdělený do čtyř skupin (jaro, léto, podzim, zima), tím více si můžeme dovolit teplotních a  $u^*$  tříd.

Třídy  $u^*$  se používají k regulaci dat při analýze závislosti ekosystémové výměny energie (NEE) na  $u^*$ . Pro každou třídu  $u^*$  vezmeme průměrnou hodnotu  $u^*$  a průměrnou hodnotu NEE a poté tento nový, značně redukovaný soubor dat použijeme k analýze MPT. Stejně jako u teploty vzduchu je počet tříd závislý na velikosti souboru dat. Opět, ideální velikost datasetu je jeden rok.

Pro samotný nástroj detekce  $u^*$  je třeba poskytnout TOVI následující parametry. Jak pro metodu MPT, tak metodu CPD je nezbytná znalost NEE (v případě stanice EC LIHOVAR je jedinou možností použití toku  $\text{CO}_2$ ), následně je potřeba vyplnit tyto veličiny: třetí rychlost (vybíráme pouze, pokud je na stanici více než jeden ultrazvukový anemometr), měření teploty

vzduchu, měření radiace, určení počtu bootstrapů, určení počtu teplotních tříd. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže.

Po u\* threshold detekci je provedena opět kontrola kvality (QC) označených dat u\*.

<b>NASTAVENÍ VELIČINY PRO MPT</b>	<b>NÁZEV VELIČINY/POČET</b>
Ekosystémová výměna (NEE)	FCO2 (CO <sub>2</sub> flux)
Třecí rychlost	USTAR
Teplota vzduchu	TA_1_1_1
Radiace	SW_IN_1_1_1
Hodnota bootstrapů	40
Počet tříd teploty	8
Počet u* tříd	20

*Tabulka 3 Nastavení softwarového nástroje TOVI pro MPT test*

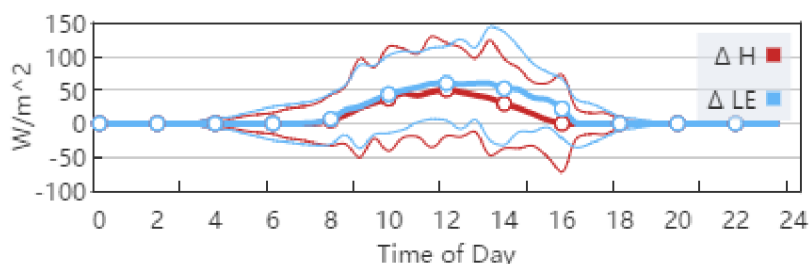
### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části práce jsou prezentovány výsledky zpracování meteorologických dat a souvisejících analýz v softwarovém nástroji TOVI. Zprv je popsána a vizualizována výsledky korekcí reziduí dle Maudera et al. (2018) a De Rooa et al. (2018) a výsledky  $u^*$  threshold detekce. Dále jsou vyhodnoceny jednotlivé složky energetické bilance: čisté sluneční záření ( $R_n$ ), zjevné teplo ( $H$ ), latentní teplo ( $LE$ ) a zásoba energie v půdě ( $G$ ). Nakonec jsou prezentovány výsledky aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ) a energetické bilance povrchu ( $EB$ ). Veškeré grafy a vizualizace kapitoly 3.1, vyhodnocení dat, jsou pro lepší přehlednost přiloženy v příloze této práce.

#### 3.1 Vyhodnocení dat

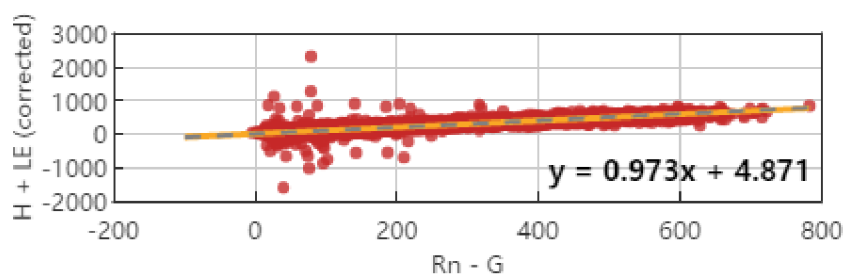
##### 3.1.1 Vyhodnocení a vizualizace korekce reziduí energetické bilance (EBR)

Mauder et al. (2013)



Obrázek 4 Graf korekce reziduí EB a rozložení energie  $H$  a  $LE$  dle Maudera et al. (2013)

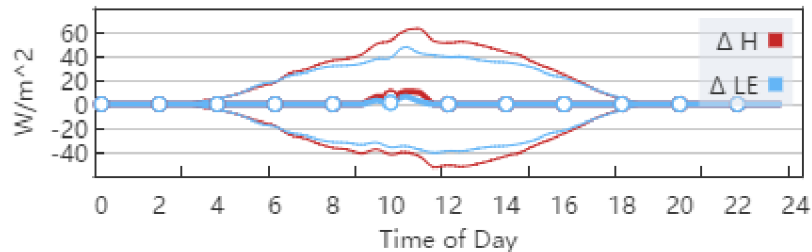
Mauder et al. (2013)



Obrázek 5 Scatter plot graf korekce reziduí dle Maudera et al. (2013) a vizualizace přerozdělení energie mezi  $H$  a  $LE$

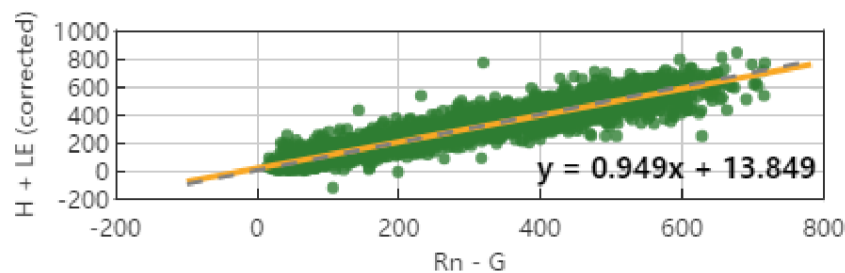
Vizualizace výsledků korekce reziduí energetické bilance dle metody Mauder et al. (2013), (*obr4, obr5*). Metoda vynucuje uzavření korekce v intervalu 24 hodin a zachovává Bowenův poměr energie (H/LE) před a po korekci na intervalu třicet minut.

**De Roo et al. (2018) A - EBR-Scaled**



*Obrázek 6 Graf korekce reziduí EB a rozložení energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), A – EBR-Scaled*

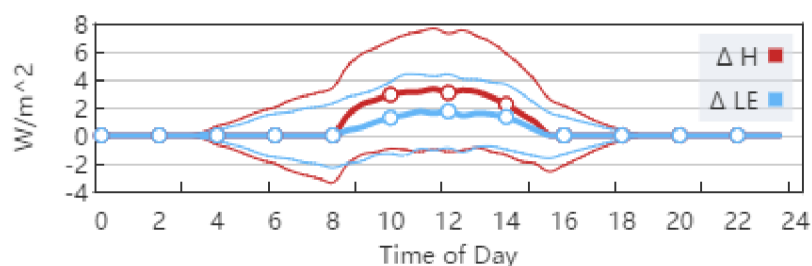
**De Roo et al. (2018) A - EBR-Scaled**



*Obrázek 7 Scatter plot graf korekce reziduí EB a vizualizace přerozdělené energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), A – EBR-Scaled*

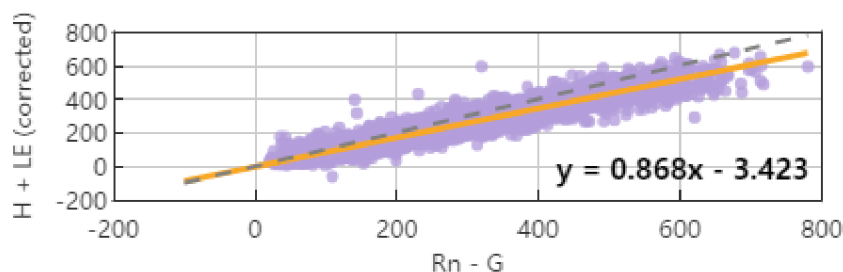
Vizualizace výsledků korekce reziduí energetické bilance dle metody De Roo et al. (2018) A, EBR-Scaled, (*obr6, obr7*). Metoda vynucuje uzavření korekce v intervalu 24 hodin a není postavena na zachování Bowenova poměru energie (H/LE). Větší díl je připisován zjevnému teplu (H), než latentnímu teplu (LE).

De Roo et al. (2018) B - Direct



Obrázek 8 Graf korekce reziduí EB a rozložení energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), B – Direct

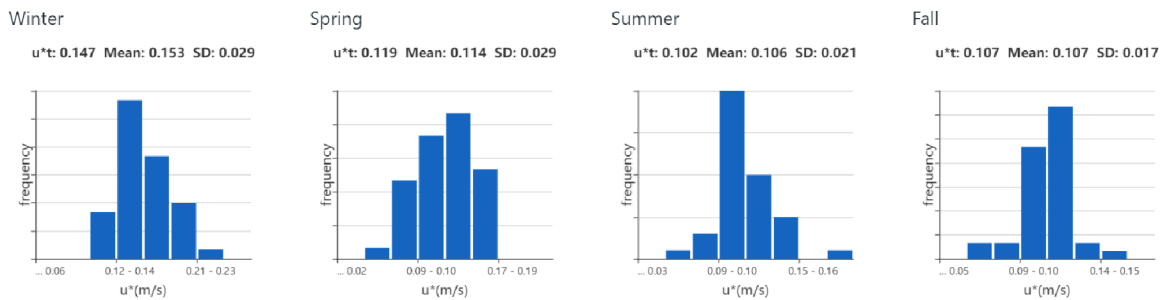
De Roo et al. (2018) B - Direct



Obrázek 9 Scatter plot graf korekce reziduí EB a vizualizace přerozdělené energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), B – Direct

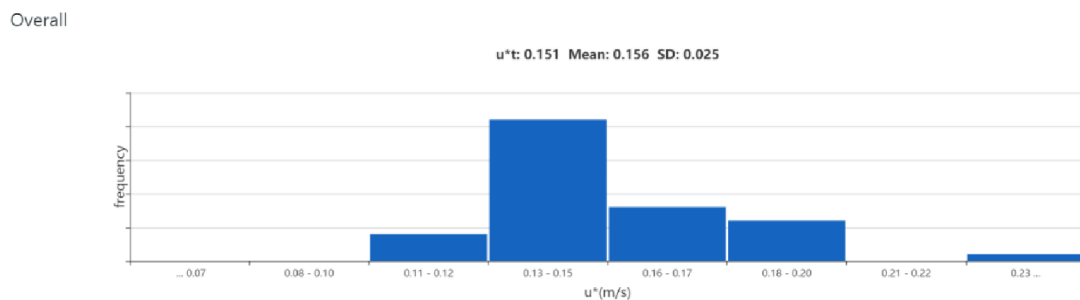
Vizualizace výsledků korekce reziduí energetické bilance dle metody De Roo et al. (2018) B, Direct, (obr8, obr9). Metoda vynucuje uzavření korekce v intervalu 24 hodin a není postavena na zachování Bowenova poměru energie (H/LE), stejně jako metoda De Roo et al. (2018) A, EBR-Scaled. Větší díl je opět připisován zjevnému teplu (H), než latentnímu teplu (LE). Metody se liší tím, že jedna je odvozena čistě bez zohlednění pozorovaného neuzavření, zatímco druhá je omezena neuzavřením vyhodnoceným na denní bázi.

### 3.1.2 Vyhodnocení $u^*$ detekce



Obrázek 10 Výsledné histogramy detekce mezní třecí rychlosti pro sezonní období zima, jaro, léto, podzim.

Zobrazení histogramů pro určení  $u^*$  detekce (třecí rychlosti větru), (obr10). Mezní hodnota třecí rychlosti v zimě je  $u^* = 0.147$  (m/s), na jaře  $u^* = 0.119$  (m/s), v létě  $u^* = 0.102$  (m/s) a na podzim  $u^* = 0.107$  (m/s).



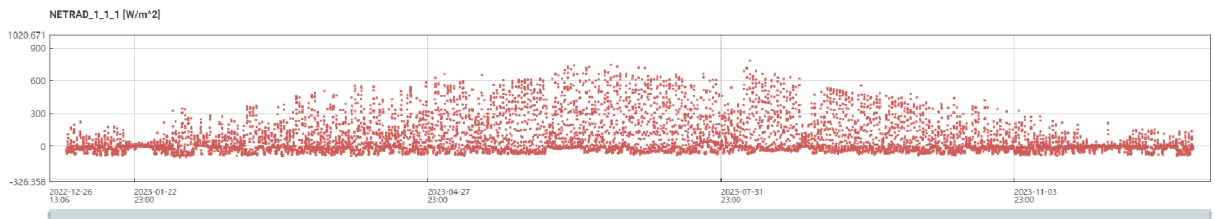
Obrázek 11 Výsledný histogram detekce mezní třecí rychlosti větru pro celé sledované období, rok 2023

Průměrná hodnota třecí rychlosti pro celý rok 2023 je  $u^* = 0.151$  (m/s), (obr11).



### 3.1.3 Vyhodnocení a vizualizace energetických složek

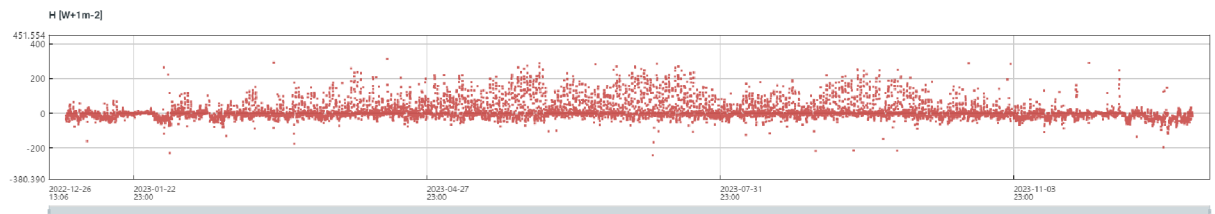
#### 3.1.3.1 Čisté sluneční záření (Rn)



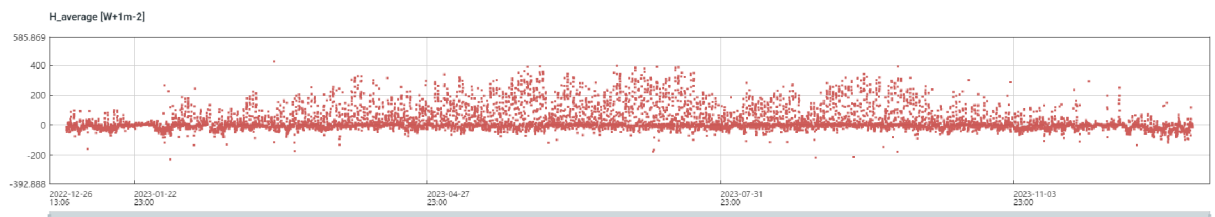
Obrázek 12 Celoroční průběh měřené veličiny Rn

Graf výše (*obr12*) zobrazuje hodnoty příjmu sluneční energie NETRAD\_1\_1\_1 naměřených meteorologickou stanicí. Maximální hodnoty sluneční energie za rok 2023 byly změřeny v první polovině měsíce srpna v 12:30 SEČ, a to velmi blízko  $800 \text{ W/m}^2$ . Maxima v nočních hodinách se pohybovaly kolem  $20 \text{ W/m}^2$ . Průměrná maximální celoroční hodnota příjmu sluneční energie pro celý den je  $356 \text{ W/m}^2$ .

#### 3.1.3.2 Zjevné teplo (H)



Obrázek 13 Celoroční průběh měřené veličiny H

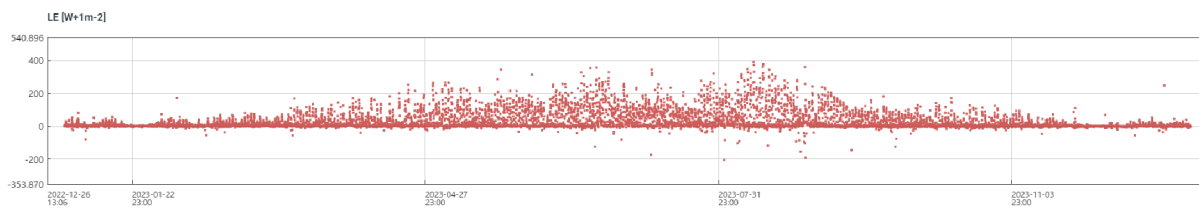


Obrázek 14 Celoroční průběh dopočítané veličiny  $H_{average}$  po korekci reziduí EB

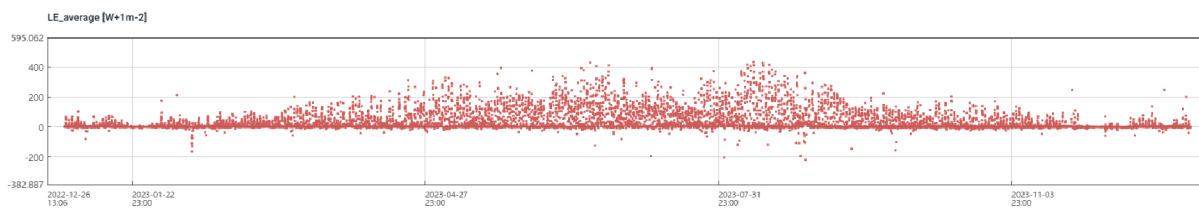
Dva výše prezentované grafy (*obr13*, *obr14*) zobrazují rozdíl mezi měřeným zjevným teplem (H) a grafem zobrazující zjevné teplo po aplikaci kvality kontroly (QC) a korekcí reziduí třemi metodami (EBR) - ( $H_{average}$ ). Minimální průměrné hodnoty zjevného tepla v případě měřeného H dosahují  $-120 \text{ W/m}^2$  a upraveného  $H_{average}$   $-108 \text{ W/m}^2$ . Maxima průměrných hodnot H pak dosahují  $150 \text{ W/m}^2$  a  $H_{average}$   $200 \text{ W/m}^2$ . Nejnížší a nejvyšší zaznamenané

hodnoty H za rok 2023 jsou  $-240 \text{ W/m}^2$  a  $312 \text{ W/m}^2$ , v případě  $H_{\text{average}}$  je to  $-229 \text{ W/m}^2$  a  $412 \text{ W/m}^2$ .

### 3.1.3.3 Latentní teplo (LE)



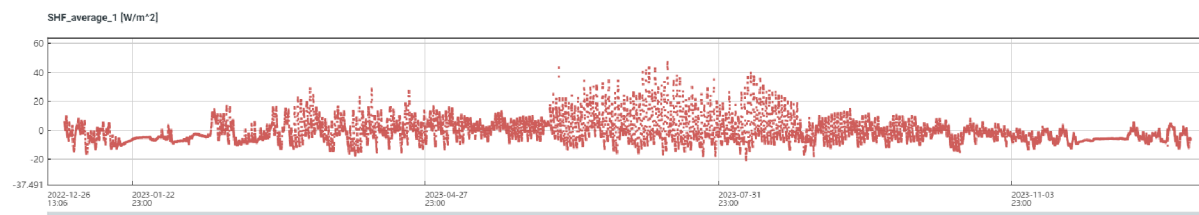
Obrázek 15 Celoroční průběh měřené veličiny LE



Obrázek 16 Celoroční průběh dopočítané veličiny  $LE_{\text{average}}$  po korekci reziduí EB

Výsledky měření latentního tepla (LE), (*obr15*, *obr16*) jsou opět rozděleny na měřenou část (LE) a část po aplikaci kontroly kvality (QC) a korekce reziduí energetické bilance (EBR) -  $LE_{\text{average}}$ . Maximální denní průměrné hodnoty LE byly  $178 \text{ W/m}^2$ , minimální průměrné pak  $-56 \text{ W/m}^2$ . Nejvyšší naměřená hodnota LE byla  $390 \text{ W/m}^2$  a nejnižší  $-190 \text{ W/m}^2$ . Po korekci reziduí byly průměrné maximální denní hodnoty  $LE_{\text{average}}$  upraveny na  $202 \text{ W/m}^2$  a průměrné minimální hodnoty na  $-70 \text{ W/m}^2$ . Maximální a minimální hodnotou  $LE_{\text{average}}$  jsou pak hodnoty  $432 \text{ W/m}^2$  a  $-219 \text{ W/m}^2$ . Největší hodnoty byly měřeny v první polovině měsíce srpna.

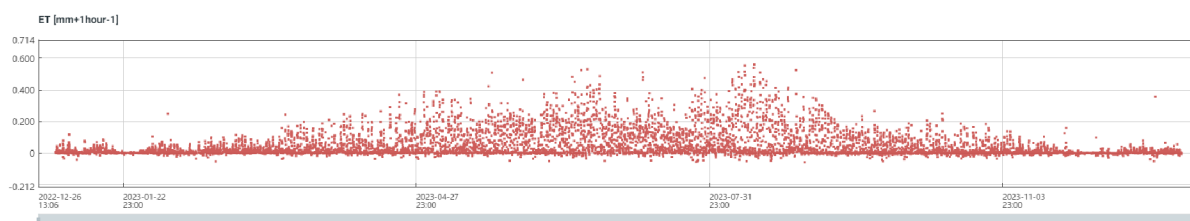
### 3.1.3.4 Zásoba energie v půdě (G)



Obrázek 17 Celoroční průběh veličiny SHF

Prezentovaný graf výše (*obr17*) je výsledkem úpravy hodnot ze tří měřených hloubek, a to SHF\_1\_1\_1 (5 cm), SHF\_2\_1\_1 (10 cm), SHF\_3\_1\_1 (20 cm). Tyto hodnoty byly zprůměrovány nástrojem AV v TOVI a podrobeny QC. Výsledný graf je zde prezentován. Průměrná denní maximální zásoba energie v půdě byla měřena 21,18 W/m<sup>2</sup> a minimální průměrná denní hodnota pak -17,28 W/m<sup>2</sup>. Maximální měřená hodnota energie v půdě za rok 2023 byla 46,79 W/m<sup>2</sup> a minimální hodnota pak -20,61 W/m<sup>2</sup>.

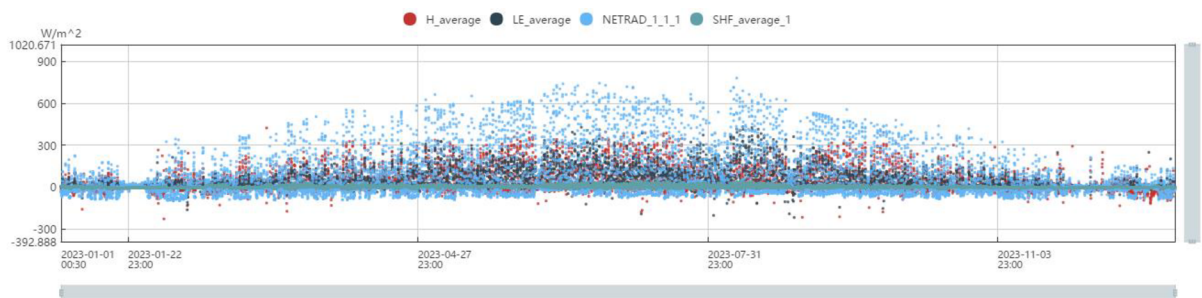
### 3.1.4 Vyhodnocení a vizualizace Aktuální Evapotranspirace (ET)



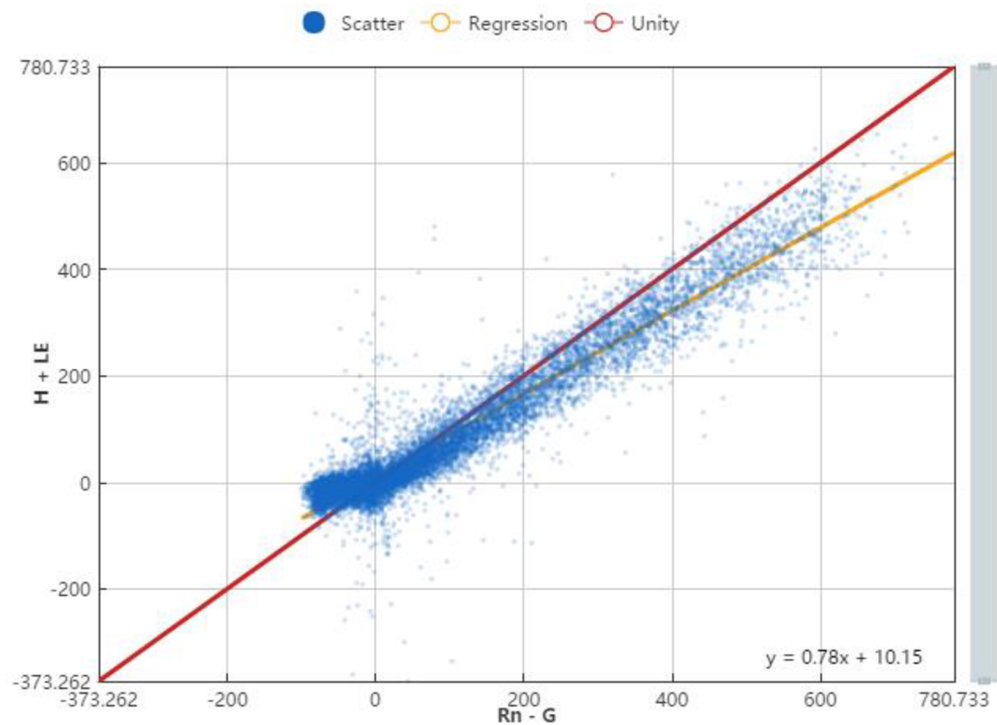
Obrázek 18 Celoroční průběh veličiny ET

Graf (*obr18*) zobrazuje sezónní variabilitu evapotranspirace během roku 2023 a vyjadřuje kopcovitý trend, který je nejen v případě ET v průběhu celého roku typický. Pozoruje se výraznější nárůst hodnot v období jara a léta, následovaný postupným poklesem v průběhu podzimu a zimy. Nejvyšší hodnoty evapotranspirace jsou dosaženy v první polovině měsíce srpna, a to 0,5593 mm/hod, což odpovídá období nejvyšších měřených hodnot letního tepla (LE) a také nejvyšších hodnot slunečního záření (Rn). Naopak, pokles a následné nejnižší hodnoty jsou zaznamenány v pozdním podzimu a zimě, kdy je nižší sluneční aktivita a pokles teplot v lokalitě. V tuto dobu je taktéž již hluboký vegetační klid. V těchto měsících byly zaznamenávány nejnižší hodnoty ET, a to -0,0353 mm/hod. Ačkoli byly měřené záporné hodnoty, je zde nutné poznamenat, že množství evapotranspirace nemůže být záporné. Záporné hodnoty znamenají opačný proces evapotranspirace, a to kondenzaci vodních par, kdy je možné, že čidla zaznamenávají záporné hodnoty evapotranspirace. Kondenzace vodní páry z atmosféry je zaznamenávána v noci a časně ráno, kdy teplota vzduchu klesne, čímž klesne i rosný bod a atmosféra již není schopna udržet veškerý objem vodních par a přebytečná voda kondenzuje na povrchu a rostlinách. Při tomto procesu je taktéž potřeba počítat s tím, že se energie nespotřebovává, ale naopak uvolňuje zpět do systému. Průměrná maximální denní hodnota ET pro celý rok 2023 pak činí 0,2560 mm/hod.

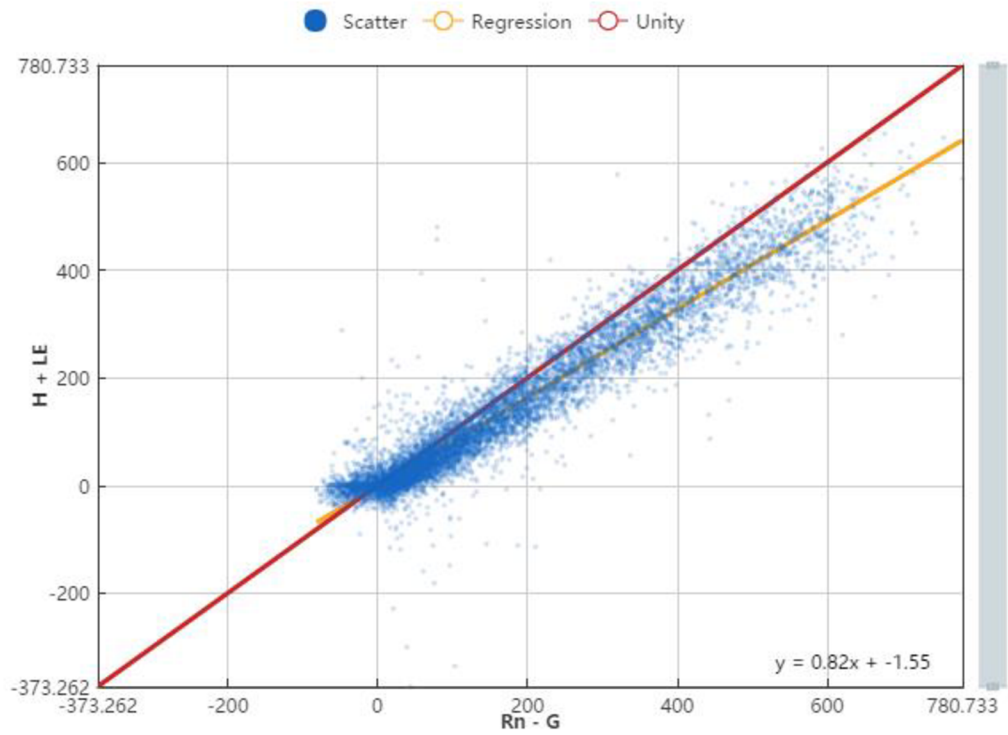
### 3.1.5 Vyhodnocení a vizualizace energetické bilance (EB)



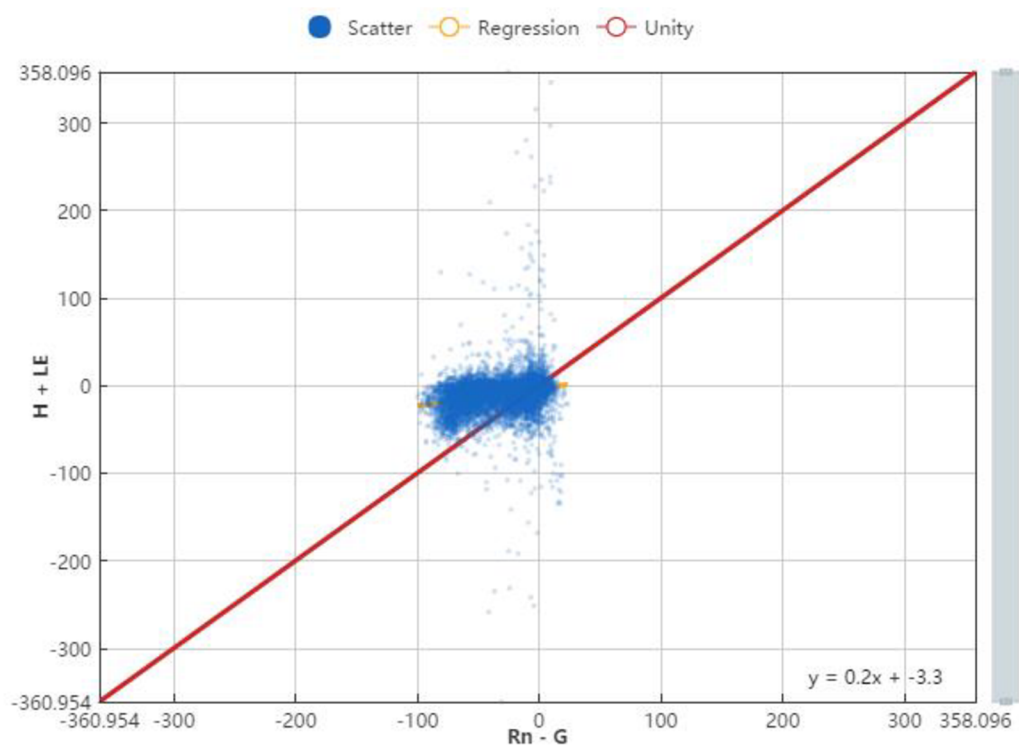
Obrázek 19 Celoroční přehled všech vstupů do modelu energetické bilance povrchu:  $H\_average$ ,  $LE\_average$ ,  $NETRAD\_1\_1\_1$  a  $SHF\_average\_1$



Obrázek 20 Vizualizace modelu energetické bilance povrchu s denní i noční složkou

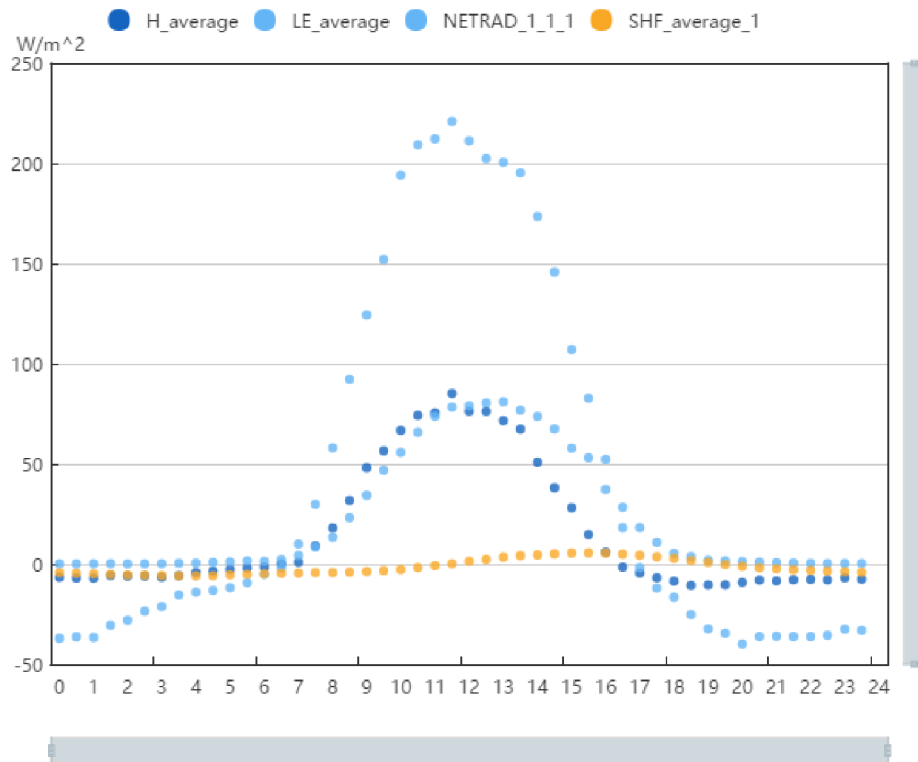


Obrázek 21 Vizualizace denního modelu energetické bilance povrchu



Obrázek 22 Vizualizace nočního modelu energetické bilance povrchu

Přehled vstupů do modelu energetické bilance (*obr19*) a výsledný scatterplot graf výsledků energetické bilance (*obr20*). Graf (*obr20*) zobrazuje denní i noční výměnu energie v prostředí. Na ose x jsou znázorněny hodnoty čistého solárního záření ( $R_n - G$ ) v jednotkách  $W/m^2$ , kde  $R_n$  představuje sluneční záření a  $G$  je zásobou tepelné energie v půdě. Na grafech (*obr21*, *obr22*) je rozdělen model energetické bilance na denní a noční složku. Na ose y jsou hodnoty turbulentního tepla a vodní páry, kdy se jedná o součet zjevného tepla a latentního tepla ( $H+LE$ ) v jednotkách  $W/m^2$ . Trendy a vzory ukazují rozložení bodů, které reprezentují výsledky energetické bilance za určité období, tedy celý kalendářní rok 2023. Z pozorovaných dat vyplývá pozitivní lineární vztah mezi  $R_n - G$  a  $H+LE$ . To naznačuje, že vyšší hodnoty čistého solárního záření jsou spojeny s vyššími hodnotami turbulentního tepla a vodní páry. Nicméně, zde je také patrná variabilita v datech, což může naznačovat další faktory ovlivňující energetickou bilanci povrchu. Rovnice grafu  $0.78x + 10.15$  popisuje aproximativní trend bodů na grafu, přičemž 0.78 představuje sklon a 10.15 je posunutí ve směru osy y. Tato lineární regrese je použita k aproximaci vztahu mezi  $R_n - G$  a  $H+LE$ . **Energetická bilance není uzavřena.** Tento fakt naznačuje, že existují další faktory, které mohou ovlivňovat energetickou bilanci a nebyly zahrnuty v této analýze, jako je například konvekce, přenos tepla vzduchem, albedo povrchu, vegetační krytí a další mikroklimatické podmínky, nebo jak již bylo zmíněno v teoretické části práce, neuzavřená energetická bilance povrchu je velmi častým jevem při měření veličin metodou Eddy Covariance a nemusí nutně znamenat chybné měření či zpracování dat. Neuzavřená bilance je patrná z toho, že hodnoty  $H+LE$  neodpovídají přesně hodnotám  $R_n - G$ .



Obrázek 23 Denní průměrné rozložení jednotlivých složek EB

Graf (obr23) zobrazuje kolísání celkového množství energie během denní doby. V průběhu dne jsou pozorovatelné změny v intenzitě slunečního záření ( $R_n$ ), zásoby tepla v půdě ( $G$ ), zjevném teple ( $H$ ) a latentním teple ( $LE$ ). Během dne lze pozorovat maximální průměrné hodnoty  $R_n$  energie mezi 7 a 17 hodinou, kdy je intenzita slunečního záření nejvyšší. Tyto hodnoty výrazně převyšují ostatní složky energetické bilance. Hodnoty  $H$  a  $LE$  vykazují podobný nárůst kolem 7 hodiny a pokles kolem 16 hodiny a v případě  $LE$  kolem 17 hodiny. Patrné je zpoždění akumulace tepla v půdě až v odpoledních hodinách.

## 4 Diskuse

V této části práce budou zhodnoceny celkové výsledky dat získaných z analýz energetické bilance (EB) a aktuální evapotranspirace ( $ET_a$ ). Nejprve bylo potřeba celkovou analýzou v softwarovém nástroji TOVI provést korekci reziduí EB. Následně byly výsledky použity pro samotné vymodelování energetické bilance za použití prezentovaných meteorologických a hydrologických veličin. Předmětem diskuse budou samotné meteorologické prvky včetně zhodnocené aktuální evapotranspirace a výsledků  $u^*$  detekce a posouzení uzavřenosti EB.

Jedním z důležitých a hlavních aspektů této analýzy byla korekce reziduí energetické bilance (EB). Původně bylo zamýšleno provést korekce všemi čtyřmi metodami dle Maudera et al., (2018), Charuchittipana et al., (2014) a dvěma metodami De Rooa et al. (2018) pro co největší přesnost výsledných výstupů a následného zprůměrování těchto korekcí. Z důvodu nefunkčnosti jedné metody byla korekce reziduí energetické bilance (EBR) provedena třemi metodami, přičemž dvě z nich poskytly velmi podobné výsledky, a to korekce metodou dle Maudera et al., (2018) a první metody De Rooa et al. (2018) - A, EBR-Scaled. Nicméně, třetí metoda De Rooa et al. (2018) B-Direct vykazovala menší rozdíly, což může poukazovat na možné nedostatky v určitých aspektech modelování této metody. Dle mého názoru se jedná pouze o lehké nepřesnosti z důvodu přerozdělování energie při částečném ignorování Bowenova poměru a nevynucení uzavření na denní bázi. Nakonec byly pro zprůměrování výsledků zjevného tepla (H) a latentního tepla (LE) použity všechny tři korekce a vznikly tak výsledné veličiny H a LE, a to  $H_{average}$  a  $LE_{average}$ .

Dalším významným parametrem pro analýzu dat jsou mezní hodnoty třecí rychlosti větru, tedy  $u^*$  detekce, která byla provedena v rámci pracovního postupu v nástroji TOVI. Detekce mezní hodnoty třecí rychlosti je pro nás důležitá, protože nám poskytuje informaci o spolehlivosti dat získaných ze stanic Eddy Covariance (EC). Třecí rychlost je hlavní proměnnou při měření toků plynů a tepelného toku mezi povrchem a atmosférou. Z výsledků analýz plyne, že mezní hodnota třecí rychlosti se významně liší podle ročních období. V zimě dosahuje hodnoty 0.147 m/s, na jaře 0.119 m/s, v létě 0.102 m/s a na podzim 0.107 m/s. Průměrná hodnota třecí rychlosti pro celý rok 2023 činí 0.151 m/s. Tyto hodnoty byly získány po určení množství bootstrapů na hodnotu 40, což je nezvykle malé množství, ale při zkouškách se i takto malé množství bootstrapů ukázalo jako dostatečné a nebylo třeba použít standardizované množství 100, dle AmeriFLUX.



Dále budou diskutovány všechny energetické složky EB. Tedy  $R_n$ ,  $H$ ,  $LE$  a  $G$ .

Grafy všech těchto veličin se vyznačují kopcovitým trendem. Z důvodu, že se tato práce zabývá energetickou výměnou a sleduje sezonní parametry energetických toků v prostředí statku Amálie během celého kalendářního roku, konkrétně 2023, je zřejmé, že nejvyšší hodnoty  $R_n$  budou z důvodu vyšší sluneční aktivity hlavně v letních měsících, konkrétněji v první polovině měsíce srpna. Právě v první polovině srpna roku 2023 jsou měřeny nejvyšší hodnoty  $R_n$ ,  $H$ ,  $LE$  a  $G$ . Pravděpodobně se tak děje z důvodu nejvyšších ročních teplot v tuto dobu a nejvyšších hodnot  $R_n$ . Teploty v první polovině srpna dosahovaly až na hranici  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  a hodnoty  $R_n$  šplhaly na hranici  $800\text{ W/m}^2$ . Vysoké hodnoty  $H$ ,  $LE$  a  $G$ , tedy  $412\text{ W/m}^2$ ,  $390\text{ W/m}^2$  a  $45\text{ W/m}^2$  jsou pak nejspíše reakcí na právě vysoké hodnoty meteorologických veličin  $R_n$  a  $T$ . Zásoba energie v půdě se měnila v závislosti na různých podmínkách okolí stanice, jako například výška okolní vegetace, typ půdním pokryvu, nebo například na přítomnosti sněhové pokrývky v daném prostředí kolem půdních čidel.

Na základě diskutovaných informací z předchozích částí této práce je možno dále analyzovat aktuální evapotranspiraci ( $ET_a$ ). Z analýzy dat evapotranspirace plyne, že maximální hodnoty této veličiny se vyskytovaly v měsíci srpnu, kdy se pohybovaly kolem  $0,5\text{ mm/hod}$ , což jsou již velmi významné hodnoty výparu vody z krajiny. Tento trend koresponduje s obdobím nejvyšších hodnot  $R_n$ ,  $LE$ ,  $H$  a  $G$ , které jsme pozorovali v první polovině tohoto měsíce. Hodnoty evapotranspirace jsou víceméně závislé na hodnotách příjmu energie a teploty, méně závislé pak na například relativní vlhkosti vzduchu, nebo rychlosti větru. Trend vývoje množství vody vypařené do atmosféry tedy v podstatě kopíruje během celého roku vývoj teplot, dostupného množství energie potřebného pro proces evapotranspirace a dalších meteorologických proměnných, na kterých je množství evapotranspirace více či méně závislé.

Z předchozích částí práce víme, že energetická bilance povrchu vykazuje sezónní a denní variabilitu, což je patrné z naměřených hodnot příjmu sluneční energie ( $R_n$ ), zjevného tepla ( $H$ ), latentního tepla ( $LE$ ) a zásoby energie v půdě ( $G$ ). Graf výsledků energetické bilance ukazuje vztah mezi čistým slunečním zářením ( $R_n - G$ ) a zjevným a latentním teplem ( $H+LE$ ). Je samozřejmé, že existuje pozitivní lineární vztah mezi těmito dvěma veličinami, což naznačuje, že vyšší hodnoty čistého slunečního záření jsou spojeny s vyššími hodnotami  $H$  a  $LE$ . Nicméně, při bližším pohledu je patrné, že **energetická bilance** lokality statku Amálie měřená stanicí Eddy Covariance pro kalendářní rok 2023, **není uzavřená**. To znamená, že hodnoty zjevného a latentního ( $H+LE$ ) neodpovídají přesně hodnotám čistého solárního záření ( $R_n - G$ ). Tato neuzavřenost naznačuje, že existují faktory, které ovlivňují energetickou bilanci

povrchu, ať už jde o možné chyby v měření či zpracování dat, podhodnocení turbulentních toků H a LE, nebo možnou existenci většího množství ovlivňujících faktorů. Dle mého názoru je ve všem tak trochu pravda. Jak již bylo popsáno v kapitole o zpracování dat, neexistuje žádný jednotný, žádný správný test, který by odstranil všechna nekvalitní data, a naopak všechna kvalitní zachoval. Je tedy možné, že při procesu analýzy a zpracování dat byla odstraněna některá kvalitní data, a naopak některá nekvalitní byla zachována v analýze. Stanice Eddy Covariance mají z důvodu samotného principu měření problém s podhodnocováním turbulentních toků H a LE, tedy veličin, které jsou měřené právě metodou EC. O těchto chybách a následných neuzavření EB se můžeme dočíst například v následujících studiích Wilsona et al. (2002), Franssena et al. (2010), Charuchittipana et al. (2014), a v mnoha dalších. V neposlední řadě je s největší pravděpodobností více než jasné, že existují i jiné, možná často zanedbatelné faktory ovlivňující výměny energie v systému krajiny jako například albedo povrchu, nebo samotné podmínky atmosféry, nebo například přítomnost aerosolů, či jiných látek v atmosféře.

Detailnější analýza těchto faktorů by mohla poskytnout hlubší vhled do procesů ovlivňujících energetickou bilanci a její neuzavřenost.

Na základě výsledků této práce a diskusí lze konstatovat, že sezónní i denní variabilita energetické bilance má významný dopad na mikroklima dané oblasti. Dále je důležité zdůraznit potřebu dalšího výzkumu zaměřeného na identifikaci faktorů ovlivňujících energetickou bilanci a evapotranspiraci, stejně jako na vývoj a zdokonalení metod analýzy a korekce dat. Všechny tyto prostředky povedou k zdokonalení pozorování systému krajiny a celkového cyklu energie. Celkově lze tedy konstatovat, že analýza poskytuje důležité poznatky o energetické bilanci a evapotranspiraci v dané oblasti, které mají široké implikace pro ekosystém krajiny a lidskou činnost.

## 5 Závěr

Tato práce měla za úkol popsat principy měření meteorologických dat metodou Eddy Covariance (EC) a z měřených dat touto metodou sestavit informace o aktuální evapotranspiraci ( $ET_a$ ) a energetické bilanci povrchu (EB).

V rámci teoretické části práce byly představeny principy měření stanicí Eddy Covariance včetně klimatických podmínek lokality statku Amálie a samotné stanice EC pro pochopení původu dat. Dále byly popsány všechny potřebné meteorologické veličiny, jejichž znalost byla zásadní pro sestavení energetické bilance, a to: informace o aktuální evapotranspiraci ( $ET_a$ ), čistém slunečním záření ( $R_n$ ), zjevném teple ( $H$ ), latentním teple ( $LE$ ) a zásobě energie v půdě ( $G$ ). V teoretické části byl také uveden pracovní postup zpracování dat ze stanice EC uvedených v praktické části práce od kontroly kvality až po samotné sestavení EB.

Praktická část práce se zaměřila na sestavení a vizualizaci zpracovaných dat ze softwarového nástroje TOVI. Na základě těchto dat byly prezentovány výsledky korekcí reziduí dle Maudera et al., (2013) a dvěma metodami De Rooa et al. (2018). Následně byly vizualizovány výsledky analýzy mezní hranice třecí rychlosti větru ( $u^*$  detekce) a v neposlední řadě výsledky samotných meteorologických veličin  $R_n$ ,  $H$ ,  $LE$ ,  $G$  a  $ET$ . Pomocí těchto dat byla v kapitole 3.1.5 sestavena energetická bilance a bylo zhodnoceno uzavření či neuzavření EB.

Závěr zní, že energetická bilance na území lokality statku Amálie pro kalendářní rok 2023, není uzavřena. Možné příčiny byly diskutovány v části diskuse. Získané výstupy poskytly celkový pohled na výměnu energie mezi povrchem a atmosférou během celého kalendářního roku 2023 v lokalitě statku Amálie. Tento závěr je podpořen analýzou a vyhodnocením jednotlivých složek energetické bilance povrchu a vyhodnocením samotné energetické bilance.

Znalost energetických poměrů v systému krajiny je velmi důležitá pro pochopení a správu životního prostředí. Sledování toků energie v krajině umožňuje získat hlubší vhled do fungování ekosystémů a přírodních procesů, nebo pro širokou škálu oblastí, včetně zemědělství, lesnictví, vodního hospodářství, i pro adaptaci na klimatické změny, což je hlavním úkolem celé lokality statku Amálie. Právě sledování příjmů, výdajů a celkových toků energie v krajině nám odкрývají možnosti účinně realizovat projekty pro podporu adaptace krajiny na klimatické extrémny. Tyto projekty pak transformují běžně využívanou krajinu na chytrou krajinu, která bude do budoucna schopna odolávat větším klimatickým extrémům.

Totíž adaptace na klimatickou změnu, přesněji adaptace na klimatické extrémny jako je sucho nebo naopak přivalové deště, je něco, čím by se měli dnešní a budoucí generace krajinných inženýrů, vodních hospodářů, zemědělců, lesních hospodářů a veškerých pracovníků, kteří se podílejí na hospodaření v krajině zabývat více než kdy dříve.

## Seznam použitých zdrojů a literatury

1. BALDOCCHI, D. (2014). Measuring Fluxes of Trace Gases and Energy between Ecosystems and the Atmosphere – The State and Future of the Eddy Covariance Method. doi: [<https://doi.org/10.1111/gcb.12649>]. s3600-3609.
2. SKLENIČKA, P. et al. (2020). Chytrá zemědělská krajina proti suchu a povodním. [<https://cvpk.czu.cz/cs/r-13872-o-centru>]. s13-16.
3. QUITT, E. (1971). Klimatické oblasti Československa. Nakladatelství Academia.
4. CVPK. (2020). Centrum pro vodu, půdu a krajinu. Webová stránka. [<https://cvpk.czu.cz/cs/r-13920-chytra-krajina/r-17373-naucna-stezka-amalie/r-17393-system-eddy-covariance>].
5. GU et al. (2012). The fundamental equation of eddy covariance and its application in flux measurements. Agricultural and Forest Meteorology. doi: [<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.014>]. 152: s135-138.
6. BURBA G. & ANDERSON D. (2010). A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: principles and workflow examples for scientific and industrial applications. LI-COR Biosciences. s7-10, 15-20, 161-171.
7. BURBA, G. (2022). Eddy Covariance Method for Scientific, Regulatory, and Commercial Applications. LI-COR Biosciences. s9-13, 15-37, 225-228, 351-371.
8. KUMAR et al. (2017). Eddy covariance flux tower: A promising technique for greenhouse gases measurement. Adv. Plants Agric. Res. doi: [<https://medcraveonline.com/APAR/eddy-covariance-flux-tower-a-promising-technique-for-greenhouse-gases-measurement.html>]. 7: s337-339.
9. FOKEN, T. (2008). Micrometeorology. Berlin, Springer. s31-46, 141-146.

10. BURBA, G. (2013). Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and a real emission rates. LI-Cor Biosciences. s17-21, s245-250.
11. MONCRIEFF, J. B. et al. (1997). A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. Journal of Hydrology. doi: [\[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03194-0\]](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03194-0). s589-611.
12. BALDOCCHI, D. et al. (2001). FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society. doi: [\[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2\]](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2). s2421-2423.
13. TOLASZ, R. (2007). Atlas podnebí Česka. Český hydrometeorologický ústav. UP, Praha – Olomouc. s255.
14. MACOUNOVÁ, A. (2009). Vliv evapotranspirace na hydrologické modely. Bakalářská práce. doi: [\[http://hdl.handle.net/20.500.11956/24524\]](http://hdl.handle.net/20.500.11956/24524). s27-29.
15. GOYAL, M. R. & HARMSSEN, E. W. (2013). Evapotranspiration: principles and applications for water management. CRC Press.
16. RIJTEMA, P. E. (1965). An analysis of actual evapotranspiration. Disertační práce. doi: [\[https://edepot.wur.nl/315768\]](https://edepot.wur.nl/315768). s10-14, 15-21
17. BEZZERA, B. (2012). Crop Evapotranspiration and Water Use Efficiency. [\[http://cdn.intechopen.com/pdfs/34107/InTech-Crop\\_evapotranspiration\\_and\\_water\\_use\\_efficiency.pdf\]](http://cdn.intechopen.com/pdfs/34107/InTech-Crop_evapotranspiration_and_water_use_efficiency.pdf). s58-59
18. FRANSSSEN, H. et al. (2010). Energy balance closure of eddy-covariance data: A multisite analysis for European FLUXNET stations. Agricultural and Forest Meteorology. doi: [\[https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.005\]](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.005). s1553-1567.

19. FOKEN, T. (2008b). The energy balance closure problem: An overview. *Ecological Applications*. doi: [<https://doi.org/10.1890/06-0922.1>]. 18.6: s1351-1367.
20. UNEP & IPCC, Program OSN pro životní prostředí & Mezivládní panel klimatické změny. (2007). Webová stránka. [[https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch3s3-4-4-2.html](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-4-4-2.html)].
21. KASURINEN, V. et al. (2014). Latent heat exchange in the boreal and arctic biomes. *Global Change Biology*. doi: [<https://doi.org/10.1111/gcb.12640>]. s3439-3445.
22. VAN WIJK & DE VRIES. (1954). Evapotranspiration. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. doi: [<https://doi.org/10.18174/njas.v2i2.17849>]. s105-110.
23. ALLEN, R. G. (1998). Crop Evapotranspiration-Guideline for computing crop water requirements. Irrigation and drain. [[https://www.researchgate.net/publication/235704197\\_Crop\\_evapotranspiration-Guidelines\\_for\\_computing\\_crop\\_water\\_requirements-FAO\\_Irrigation\\_and\\_drainage\\_paper\\_56](https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56)]. s1-3, 11-16, 41-45, 70-83.
24. HARTMANN, D. L. (2015). *Global physical climatology*. Newnes.
25. MONTEITH, J. L. (1965). *Evaporation and environment*. Symposia of the society for experimental biology. Cambridge University Press (CUP). Cambridge. [<https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8v5v7/evaporation-and-environment>] s210-222.
26. DENAGER, T. et al. (2020). Comparison of evapotranspiration estimates using the water balance and the eddy covariance methods. *Vadose Zone Journal*. doi: [<https://doi.org/10.1002/vzj2.20032>]. s2-3.
27. MAUDER, M. et al. (2020). Surface-energy-balance closure over land: a review. *Boundary-Layer Meteorology*. doi: [<https://doi.org/10.1007/s10546-020-00529-6>]. s395-426

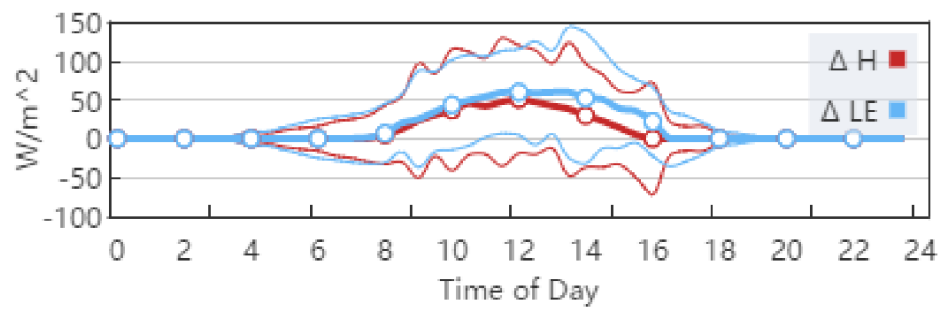
28. SELLERS, P. et al. (1995). The Boreal Ecosystem–Atmosphere Study (BOREAS): an overview and early results from the 1994 field year. *Bulletin of the American Meteorological Society*. doi: [[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<1549:TBESAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<1549:TBESAO>2.0.CO;2)]. s1552-1572
29. BERKOWICZ, R. & PRAHM, L. P. (1982). Sensible heat flux estimated from routine meteorological data by the resistance method. *Journal of Applied Meteorology* (1962-1982). doi: [<https://www.jstor.org/stable/26180790>]. s1845-1864.
30. LI-COR Biosciences. (2021). TOVI software user guide. Version 2.9. Manual
31. MAUDER, M. et al. (2018). Evaluation of energy balance closure adjustment methods by independent evapotranspiration estimates from lysimeters and hydrological simulations. *Hydrological Processes*. doi: [<https://doi.org/10.1002/hyp.11397>]. 32.1: s39-50.
32. BALDOCCHI, D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*. doi: [<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x>]. s480-481.
33. AUBINET, M. et al. (2012). Eddy Covariance CO<sub>2</sub> flux measurements in nocturnal conditions: an analysis of the EuroFlux methodology. *Agricultural and Forest Meteorology*. doi: [<https://doi.org/10.1890/06-1336.1>]. s1368-1370.
34. ACKERMAN, S. A. et al. (2011). *Meteorology*. Jones & Bartlett Publishers. s30-42.
35. SHUTTLEWORTH, W. J. (1985). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. doi: [<https://doi.org/10.1002/qj.49711146910>]. s841-850.
36. ISAAC, P. et al. (2017). OzFlux data: network integration from collection to curation. *Biogeosciences*. doi: [<https://doi.org/10.5194/bg-14-2903-2017>]. s2911-2916.



37. DE ROO, F. et al. (2018). A semi-empirical model of the energy balance closure in the surface layer. doi: [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209022>]. s3-7.
38. REICHSTEIN, M. et al. (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global change biology*. doi: [<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>]. s1424-1439.
39. FRANSSEN, H et al. (2010). Energy balance closure of eddy-covariance data: A multisite analysis for European FLUXNET stations. *Agricultural and Forest Meteorology*. doi: [<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.005>]. s1553-1567.
40. CHARUCHITTIPAN, D et al. (2014). Extension of the averaging time in eddy-covariance measurements and its effect on the energy balance closure. *Boundary-Layer Meteorology*. doi: [<https://doi.org/10.1007/s10546-014-9922-6>]. s303-327.
41. WILSON, K. et al. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and forest meteorology*. doi: [[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00109-0)]. s223-243.

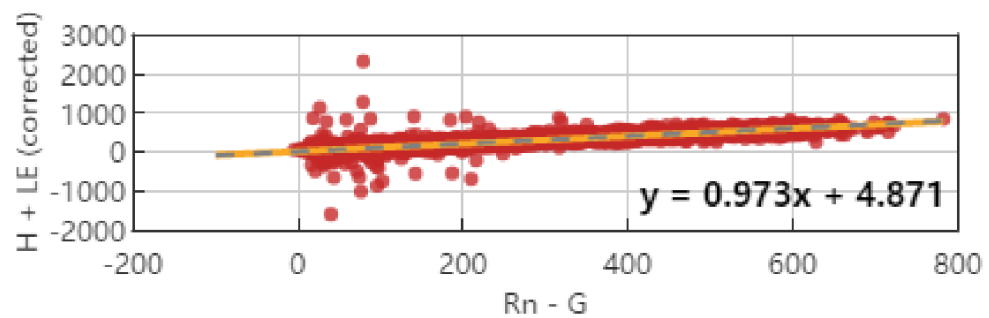
## Přílohy

Mauder et al. (2013)



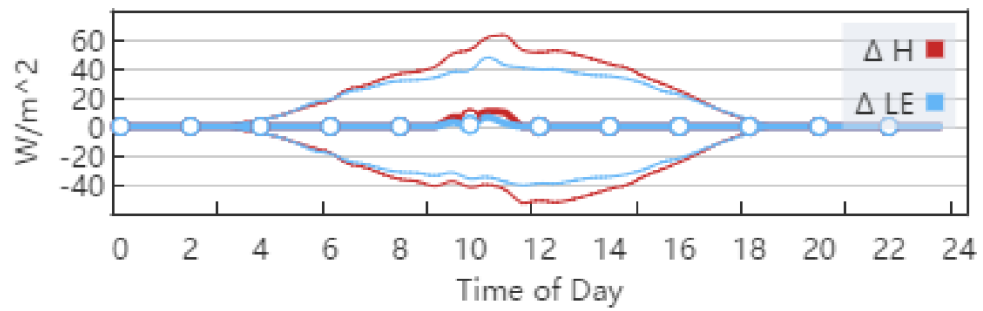
Obrázek 4 Graf korekce reziduí EB a rozložení energie H a LE dle Maudera et al. (2013)

Mauder et al. (2013)



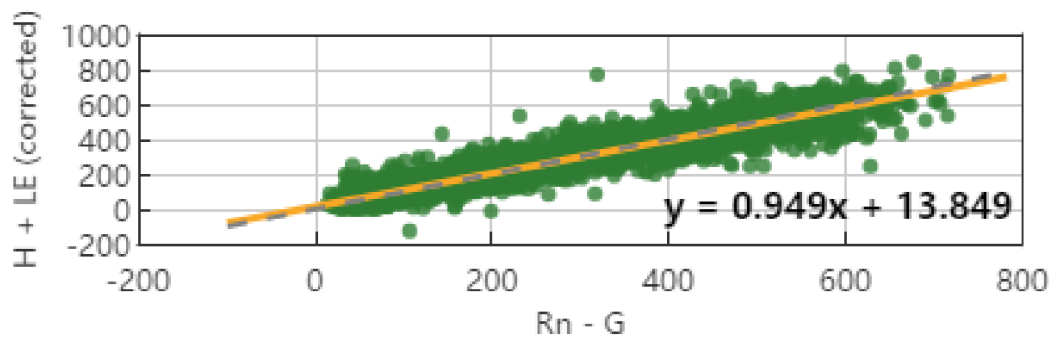
Obrázek 24 Scattler plot graf korekce reziduí dle Maudera et al. (2013) a vizualizace přerozdělení energie mezi H a LE

### De Roo et al. (2018) A - EBR-Scaled



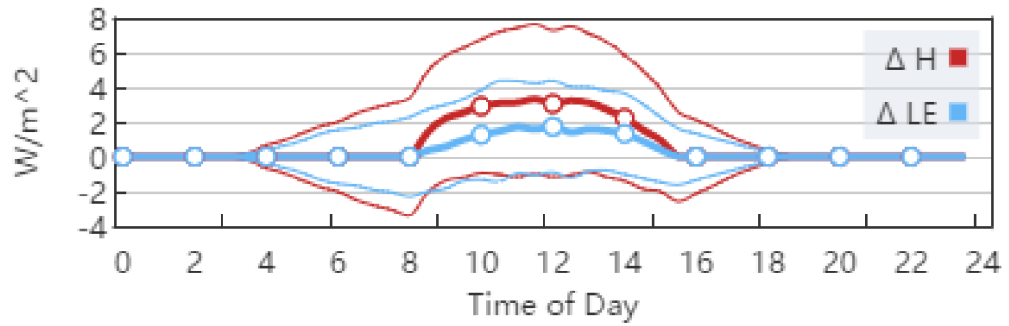
Obrázek 25 Graf korekce reziduí EB a rozložení energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), A – EBR-Scaled

### De Roo et al. (2018) A - EBR-Scaled



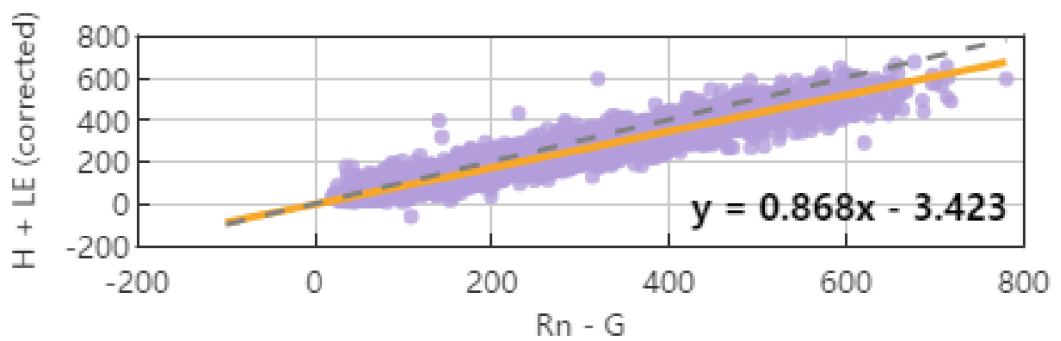
Obrázek 26 Scatter plot graf korekce reziduí EB a vizualizace přerozdělené energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), A – EBR-Scaled

### De Roo et al. (2018) B - Direct



Obrázek 27 Graf korekce reziduí EB a rozložení energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), B – Direct

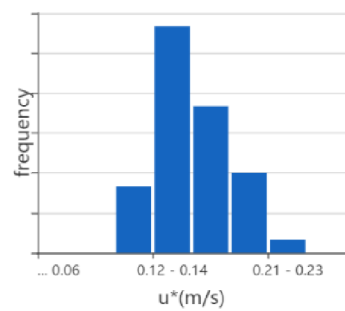
### De Roo et al. (2018) B - Direct



Obrázek 28 Scatter plot graf korekce reziduí EB a vizualizace přerozdělené energie H a LE dle De Rooa et al. (2018), B – Direct

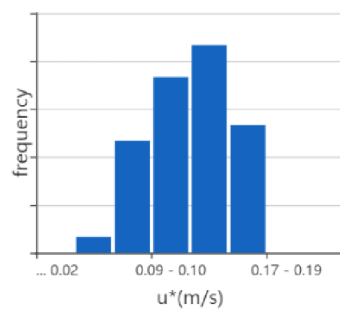
Winter

$u^*t$ : 0.147 Mean: 0.153 SD: 0.029



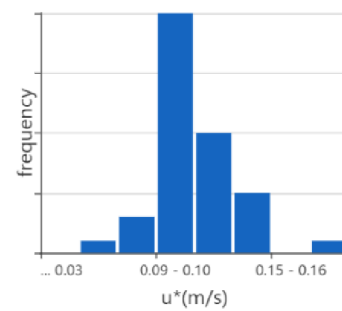
Spring

$u^*t$ : 0.119 Mean: 0.114 SD: 0.029



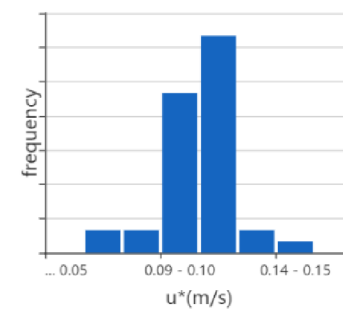
Summer

$u^*t$ : 0.102 Mean: 0.106 SD: 0.021



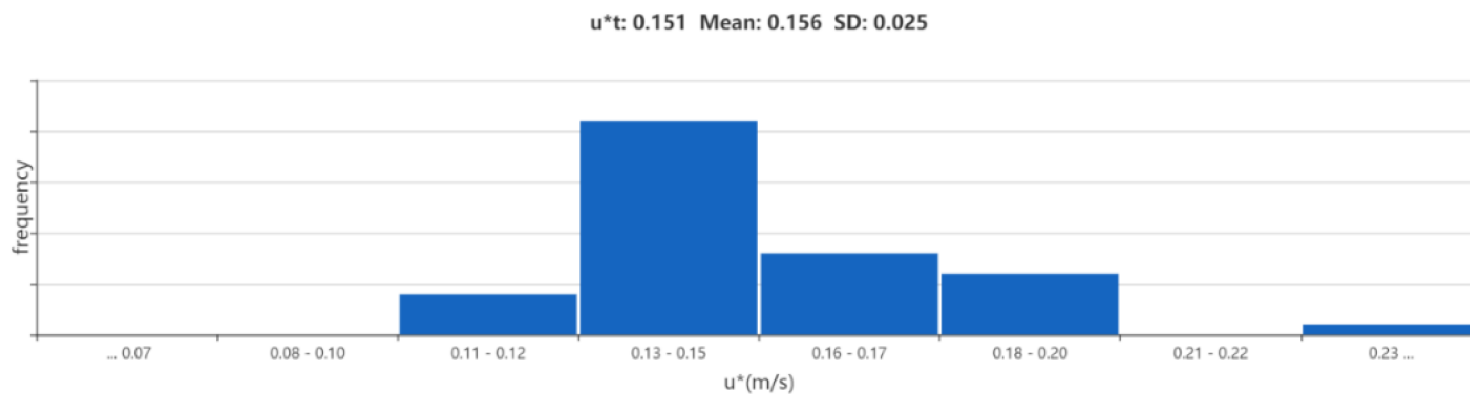
Fall

$u^*t$ : 0.107 Mean: 0.107 SD: 0.017

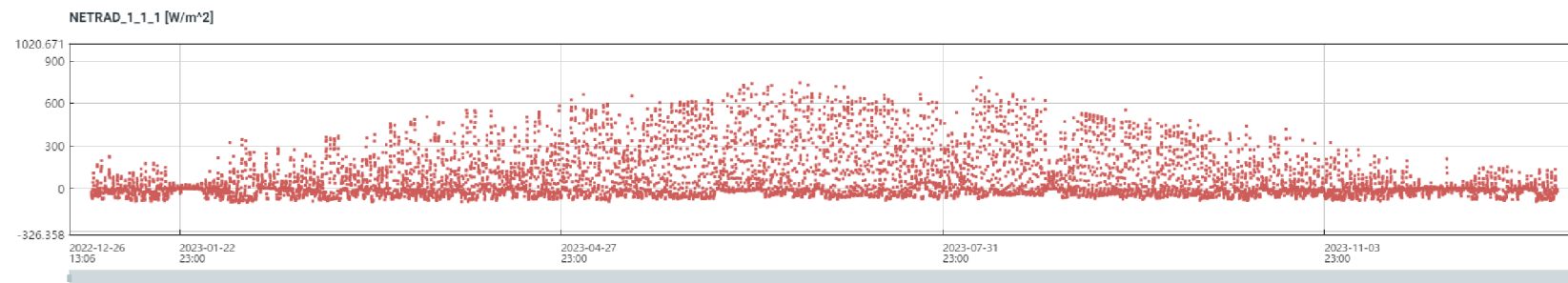


Obrázek 29 Výsledné histogramy detekce mezní třecí rychlosti pro sezonní období zima, jaro, léto, podzim.

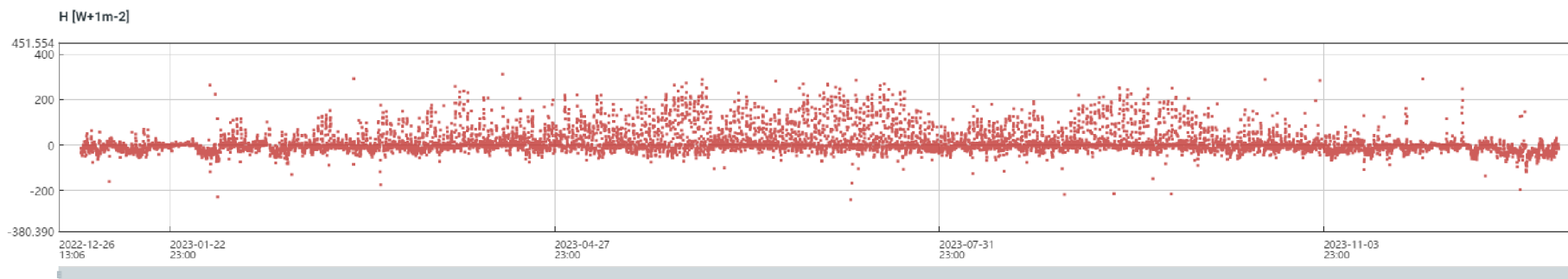
Overall



*Obrázek 30 Výsledný histogram detekce mezní třecí rychlosti větru pro celé sledované období, rok 2023*

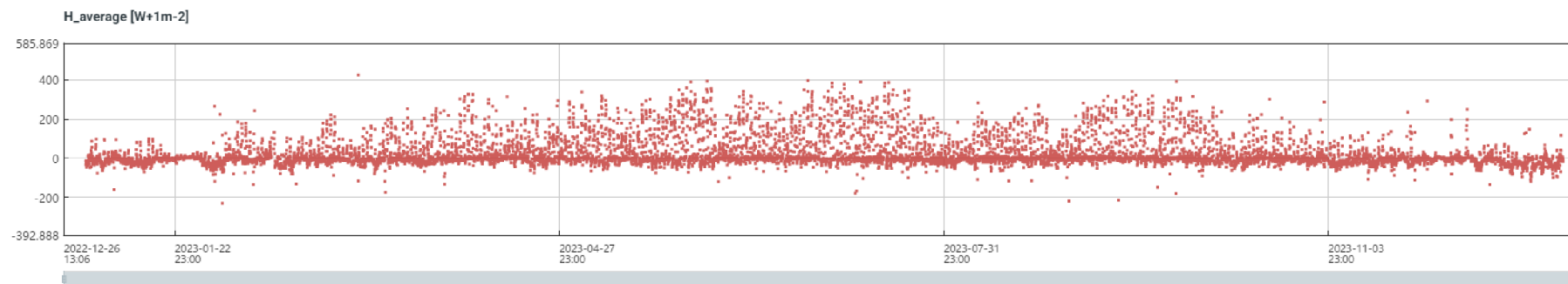


*Obrázek 31 Celoroční průběh měřené veličiny Rn*

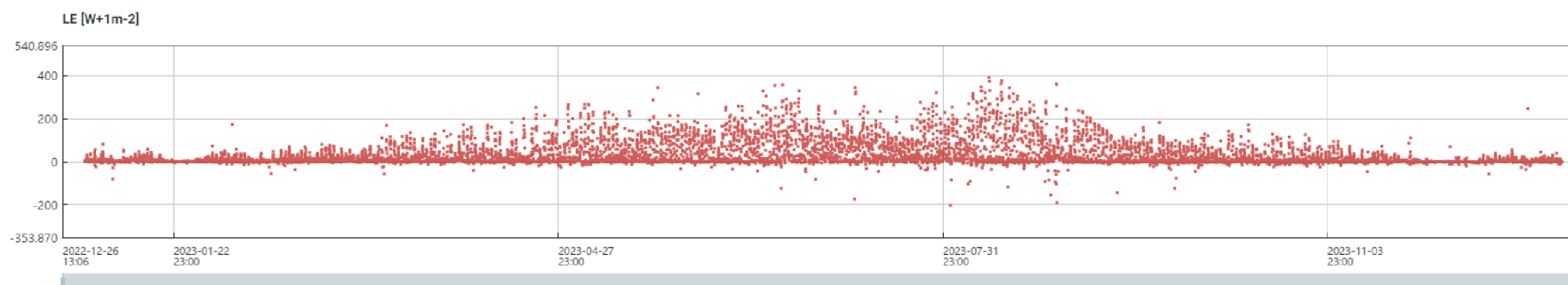


*Obrázek 32 Celoroční průběh měřené veličiny H*

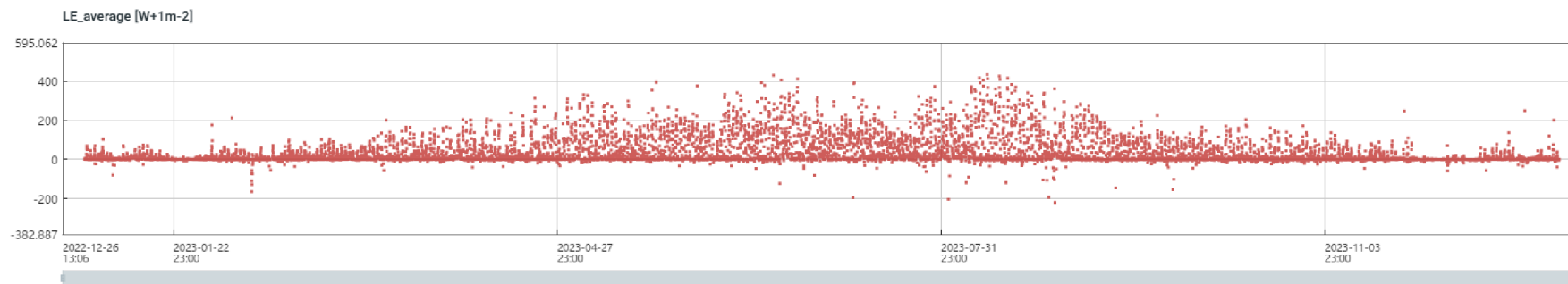




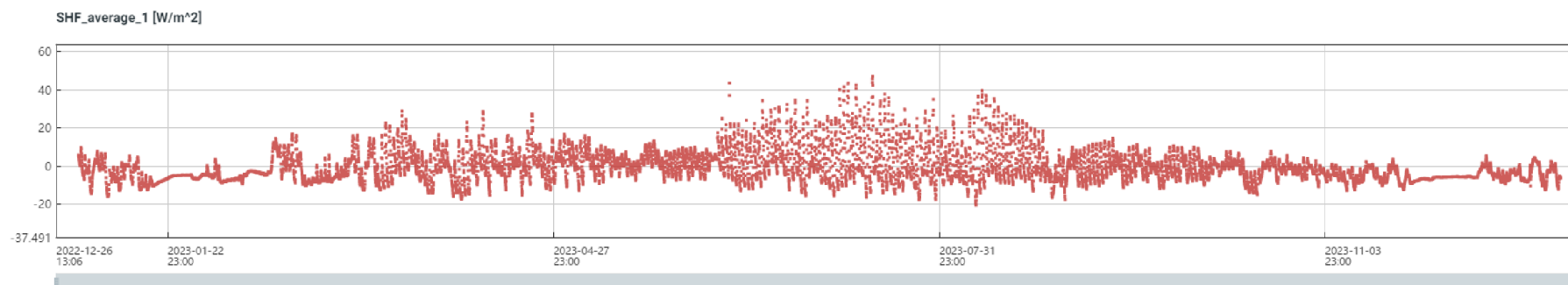
*Obrázek 33 Celoroční průběh dopočítané veličiny  $H\_average$  po korekci reziduí EB*



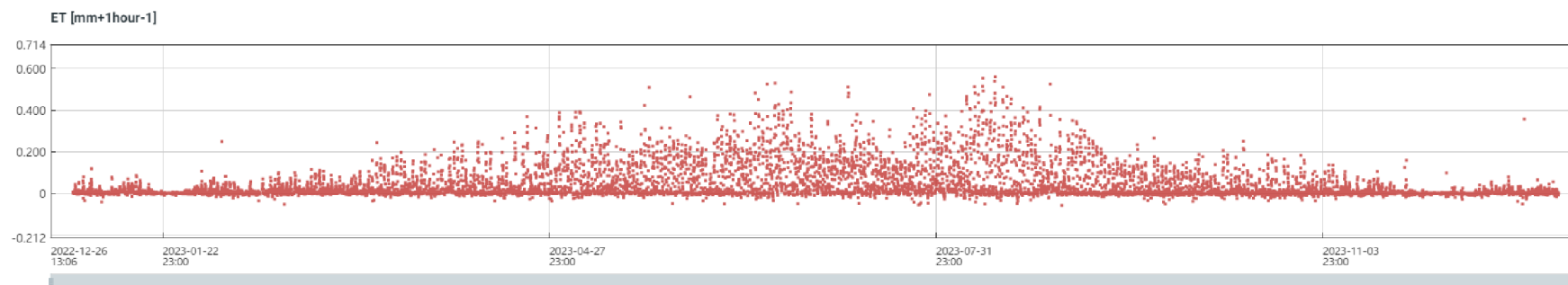
*Obrázek 34 Celoroční průběh měřené veličiny LE*



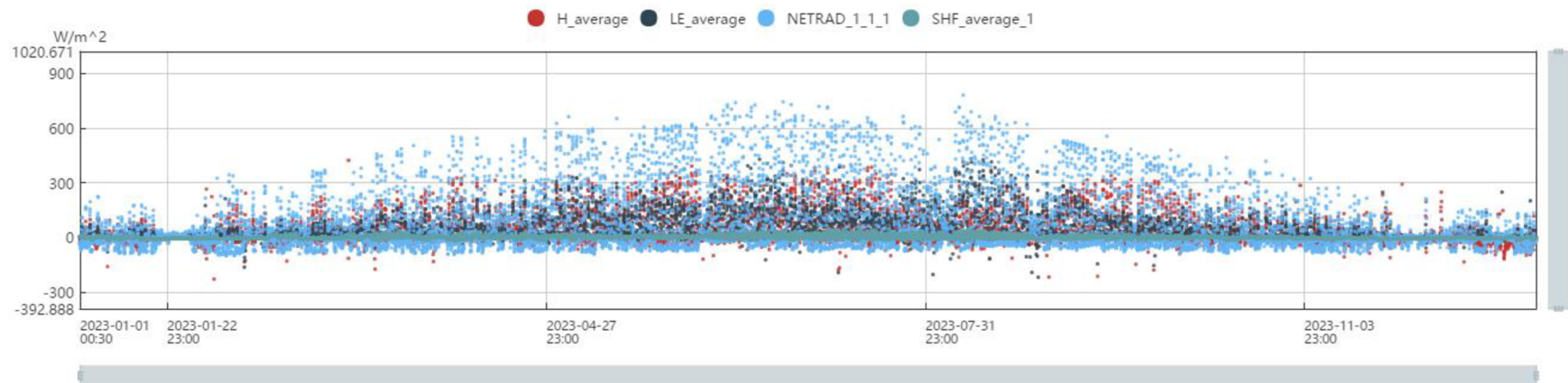
*Obrázek 35 Celoroční průběh dopočítané veličiny  $LE\_average$  po korekci reziduí  $EB$*



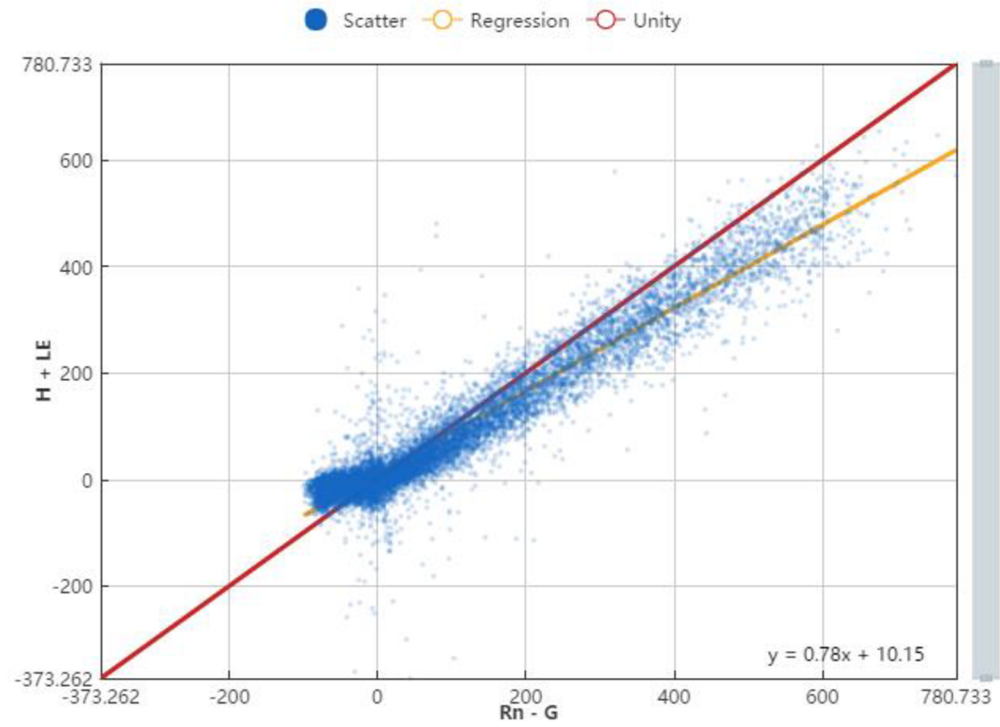
Obrázek 36 Celoroční průběh veličiny SHF



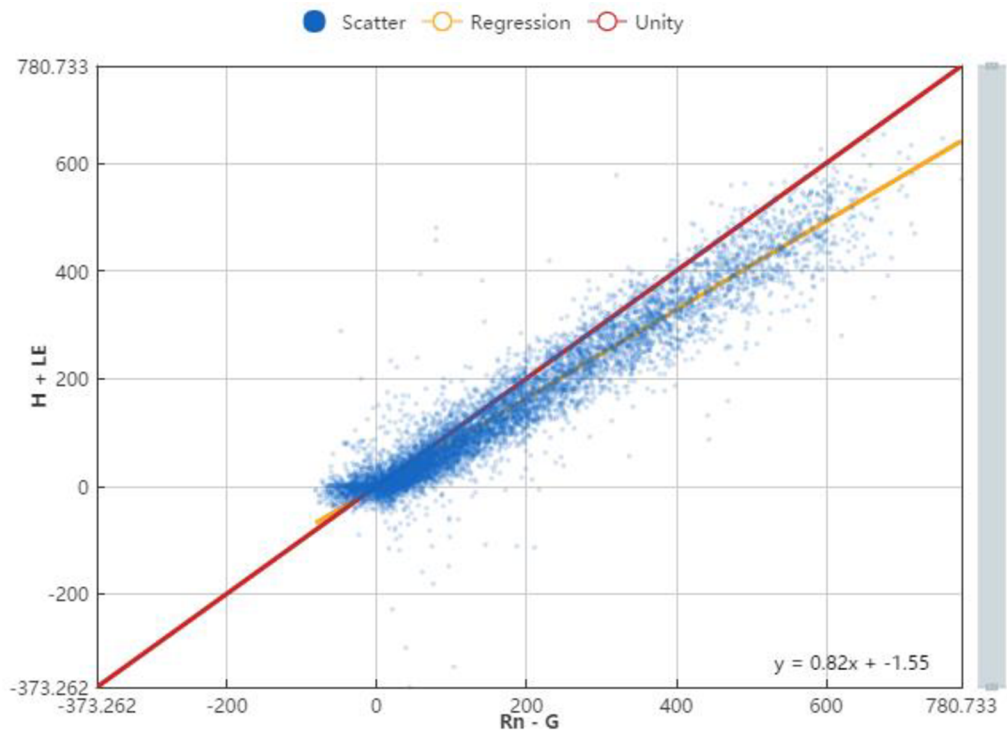
*Obrázek 37 Celoroční průběh veličiny ET*



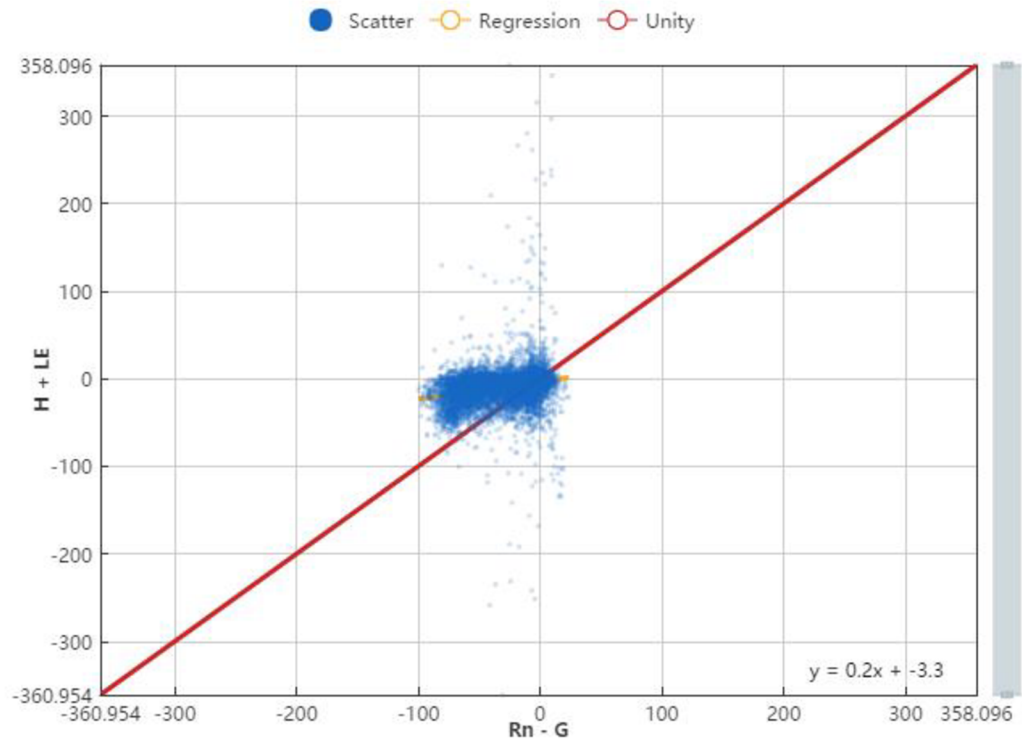
*Obrázek 38 Celoroční přehled všech vstupů do modelu energetické bilance povrchu:  $H\_average$ ,  $LE\_average$ ,  $NETRAD\_1\_1\_1$  a  $SHF\_average\_1$*



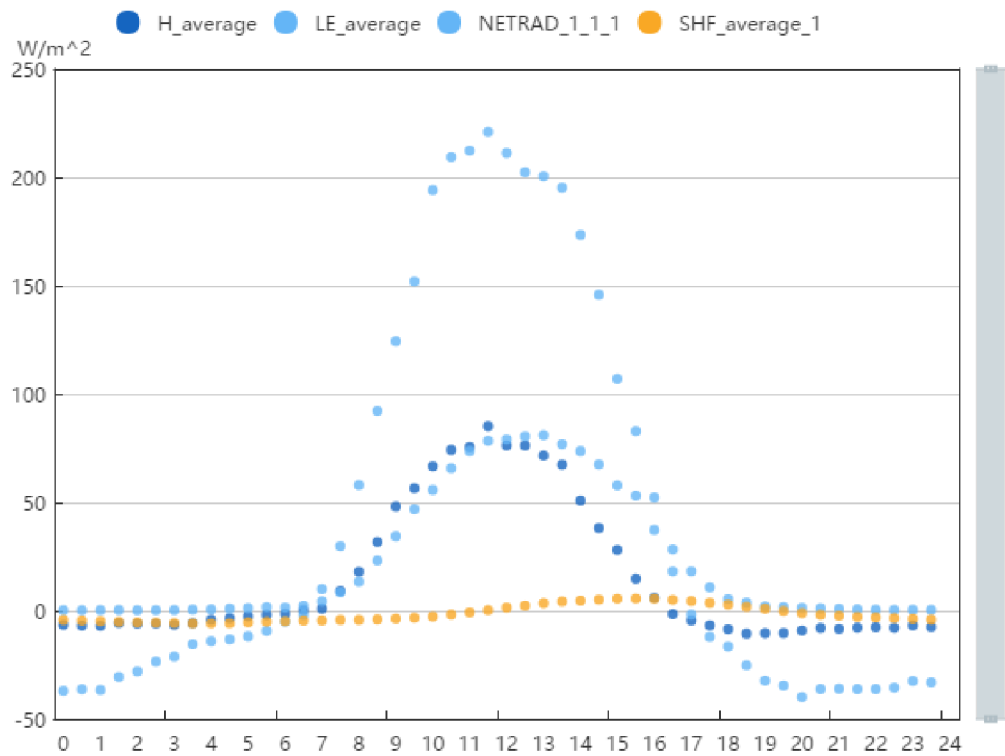
Obrázek 39 Vizualizace modelu energetické bilance povrchu s denní i noční složkou



Obrázek 40 Vizualizace denního modelu energetické bilance povrchu



Obrázek 41 Vizualizace nočního modelu energetické bilance povrchu



Obrázek 42 Denní průměrné rozložení jednotlivých složek EB