



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

# MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ NA LAGUNĚ HULÍN

MEASUREMENT AND EVALUATION OF WAVE EVENTS AT HULÍN LAKE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Skřečková

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV ŠPANO, Ph.D.

BRNO 2021



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav vodních staveb

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Kateřina Skřečková
<b>Název</b>	Měření a vyhodnocení vlnových událostí na laguně Hulín
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Miroslav Špano, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2020
<b>Datum odevzdání</b>	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Čábelka, J.; Novák, P. Hydrotechnický výzkum I, modelový výzkum SNTL, Praha, 1964

Pullen, T.; Allsop, N. W. H.; Bruce, T.; Kortenhaus, A.; Schüttrumpf, H. & der Meer, J. W. EurOtop, European Overtopping Manual-Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual Environment Agency, ENW, KFKI, 2007

Spanilá, T.; Jahoda, K. K charakteristikám větrových vln a zkušenosti s vyhodnocením záznamu vlnoměru Journal of Hydrology and Hydromechanics, Institute of Hydrology of the Slovak Academy of Sciences and the Institute of Hydrodynamics of the Academy of Sciences of the Czech Republic, 2004, 52, 115-124

USACE Shore protection manual USACE, 1984

Dean, R. & Dalrymple, R. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists World Scientific Publishing Company, 1991

WAFO - a Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads: Tutorial for WAFO version 2017 [online]. Lund University: Faculty of Engineering, Center for Mathematical Sciences, Mathematical Statistics, 2017.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci práce provede studentka zpracování dat o měření vlnových událostí na laguně Hulín a jejich vyhodnocení. Sledovat bude základní parametry vln, tj. výšku a délku vlny, periodu a tvar spektra. Práce bude sestavena do ucelené zprávy, kde bude popsán způsob měření, postup zpracování a vyhodnocení měřených událostí. Přílohou zprávy budou zpracovaná data z měření.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Miroslav Špano, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKTY A KLÍČOVÁ SLOVA**

### **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je zpracování dat o měření vlnových událostí na laguně Hulín a jejich vyhodnocení. Data jsou zpracovávána v prostředí MATLAB, díky kterému lze vyhodnotit základní parametry jako jsou výšky a délky vlny, perioda a tvar spektra.

### **KLÍČOVÁ SLOVA**

vodní nádrž, vlna, perioda vlny, výška vlny, směrové spektrum, spektrální hustota

### **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to process data on wave event measurement on hulín lagoon and their evaluation. The data is processed in the MATLAB environment, thanks to which basic parameters such as wave heights and lengths, period and spectrum shape can be evaluated.

### **KEYWORDS**

water reservoir, wave, wave period, wave height, directional spectrum, spectral density

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Kateřina Skřečková *Měření a vyhodnocení vlnových událostí na laguně Hulín*. Brno, 2021. 71 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Miroslav Špano, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

### PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Měření a vyhodnocení vlnových událostí na laguně Hulín* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 12. 2020

---

Bc. Kateřina Skřečková  
autor práce

### PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Měření a vyhodnocení vlnových událostí na laguně Hulín* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 12. 2020

---

Bc. Kateřina Skřečková  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Miroslavu Španovi Ph.D. za trpělivost, cenné rady, věcné připomínky, odborný dohled a vstřícnost při konzultacích. Dále bych ráda poděkovala své rodině za podporu, a svým spolužákům za přátelské rady a připomínky.





# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CÍL PRÁCE</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>ÚVOD DO PROBLEMATIKY VLN</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>Historie</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2</b>	<b>Dělení vln</b> .....	<b>5</b>
3.2.1	OSCILAČNÍ VĚTROVÉ VLNY .....	6
<b>3.3</b>	<b>Parametry vlny</b> .....	<b>7</b>
3.3.1	STANOVENÍ PARAMETRŮ VLNY.....	7
3.3.2	VLNOVÁ DÉLKA.....	10
3.3.3	VÝŠKA VLNY.....	10
3.3.4	PERIODA VLNY.....	11
3.3.5	PERIODICKÉ SIGNÁLY.....	11
3.3.6	SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA VÝKONU.....	11
<b>4</b>	<b>ZPŮSOB MĚŘENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ</b> .....	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Měřící technika</b> .....	<b>14</b>
4.1.1	PONORNÁ SONDA .....	14
4.1.2	BÓJE.....	14
4.1.3	AKUSTICKÉ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	16
4.1.4	RADAROVÉ SENZORY.....	18
4.1.5	OPTICKÁ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ .....	18
4.1.6	KAPACITNÍ SNÍMAČ .....	19
4.1.7	ODPOROVÝ SNÍMAČ.....	20
<b>4.2</b>	<b>Popis zařízení systému pro měření vlnových událostí</b> .....	<b>23</b>
4.2.1	SBĚR A ZÁKLADNÍ ZPRACOVÁNÍ DLOUHODOBÉ ZAZNAMENÁVANÝCH DAT .....	23
4.2.2	PŘENOS DAT .....	30
4.2.3	SYSTÉM NAPÁJENÍ.....	30
4.2.4	VZDÁLENÝ PŘÍSTUP .....	32
<b>5</b>	<b>ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>33</b>
<b>5.1</b>	<b>MATLAB</b> .....	<b>33</b>
<b>5.2</b>	<b>WAFO</b> .....	<b>33</b>
<b>5.3</b>	<b>M-soubor</b> .....	<b>34</b>
5.3.1	FUNKCE M-SOUBORU .....	34
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ NA LAGUNĚ HULÍN</b> .....	<b>40</b>
<b>6.1</b>	<b>Lokalita</b> .....	<b>40</b>
6.1.1	KLIMATICKÉ PODKLADY.....	41

6.1.2	GEOMORFOLOGICKÉ PODKLADY .....	43
6.1.3	GEOLOGICKÉ PODKLADY .....	43
6.1.4	HYDROGEOLOGICKÉ PODKLADY .....	44
6.1.5	VĚTRNOSTNÍ PODMÍNKY .....	44
<b>6.2</b>	<b>Měření vlnových událostí na laguně hulín .....</b>	<b>46</b>
6.2.1	PŘEHLED KOMPONENT SYSTÉMU .....	49
<b>6.3</b>	<b>Vlnové události na laguně hulín .....</b>	<b>52</b>
6.3.1	SMĚROVÉ SPEKTRUM PO KRUHOVÉ ORBITĚ .....	52
6.3.2	SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA.....	53
6.3.3	PRŮBĚH VLN V ČASOVÉM INTERVALU .....	54
6.3.4	HISTOGRAM HUSTOTY ROZDĚLENÍ VÝŠKY VLNY .....	54
6.3.5	VYHODNOCENÍ ANEMOMETRU .....	55
<b>6.4</b>	<b>ČSN 750255 .....</b>	<b>56</b>
6.4.1	CHARAKTERISTICKÁ VÝŠKA VLNY A JEJÍ PERIODA .....	56
6.4.2	VÝŠKA VLNY S PRAVDĚPODOBNOSTÍ PŘEKROČENÍ 1 % A 13 % .....	58
<b>6.5</b>	<b>Zhodnocení měření.....</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>62</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>66</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>68</b>
	Zkratky .....	68
	Symbyly.....	68
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>71</b>

# 1 ÚVOD

Vlny vyvolané působením větru či vodní dopravou zatěžují vodní stavby a svahy vodních nádrží. Proto je v posledních letech stále více kladen důraz na individualizaci návrhů spojenou s efektivním využitím finančních prostředků na investice do ochranných opatření. Vznikem a odhadem parametrů větrových vln, tedy jejich výpočty se zabývá norma ČSN 75 0255 *Výpočet účinku vln na stavby na vodních nádržích a zdržích* z roku 1987, která se ale opírá o výsledky výzkumů prováděných především u mořských pobřeží.

## 2 CÍL PRÁCE

Tato práce se zabývá měřením vlastností vln na uzavřené nádrži Hulín. Jsou sledovány základní parametry vln, jako je výška a délka vlny, perioda a tvar spektra.

Cíle práce:

- A) Uvedení do problematiky měření
- B) Způsob měření, měřící technika
- C) Zpracování naměřených dat v prostředí MATLAB
- D) Seznámení s lokalitou
- E) Vyhodnocení měřených událostí na laguně Hulín

## 3 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VLN

### 3.1 HISTORIE

První praktické využití předpovědi větrových vln se datuje do první poloviny 20. století, kdy byla spojena se začátkem bitvy o Normandii, i přesto že většina poznatků pochází už z první poloviny 19. století.

V roce 1956 byla národní meteorologickou službou poprvé využita numerická předpověď vln, která byla ve vydaném posudku popsána jako návod na předpovídání vln, a ne jako předpověď vln. Pracovalo se pouze základními hodnotami jako je výška a perioda vlny.

První spektrální modely nepoužívaly explicitní výpočet nelineárních interakcí, ale spektra tvaru a nárůstu energie vln, to vedlo k vytvoření první a druhé generace (1G a 2G) modelů vln. Studie SWAMP (Surface Water Ambient Monitoring Program), která porovnávala modely 1G a 2G, vedla k rozhodnutí, že je třeba započítat i nelineární interakce, tak aby byl možno pojmut rozdílné větrné podmínky. To vedlo k vytvoření třetí generace modelů vln (3G). [1]

Třetí generace byla vyvinuta ve spolupráci s Discrete Interaction Approximation (dále jen „DIA“) na nelineárních interakcích. V posledních dvou desetiletích byla jedinou ekonomicky proveditelnou parametrizací nelineárního střetu vln v té době fungujících modelů větrových vln. DIA je základem pro 3G model vln (WAVE Model – WAM). V současné době je ještě několik modelů třetí generace jako např. WAVEWATCH III, SWAN. Tyto modely v současné době nahradily většinu modelů první a druhé generace. [1]

### 3.2 DĚLENÍ VLN

Už dříve zmíněná norma ČSN 75 0255 *Výpočet účinku vln na stavby na vodních nádržích a zdržích* dělí vlny na:

- Oscilační vlny – vlny vznikající kmitáním vodních částic v uzavřených drahách, kdy nedochází k přemísťování vody ve vodorovném směru. [2]
- Translační vlny – vlny, při jejichž postupu dochází k přemísťování vodních částic ve směru vodních částic ve směru jejího postupu. [2]
- Větrové vlny – vlny vznikající na vodní hladině působením větru. Dělí se na vlny vynucené, čeřivé a smíšené. [2]
- Postupové vlny – oscilační vlny, jejichž viditelný tvar na hladině vody se přemísťuje vodorovným směrem. [2]

- Vynucené vlny – větrové vlny, na které dosud vítr působí; nejsou osově souměrné. [3]
- Čerivé vlny – pravidelné kmitové vlny, souměrné podle svislé osy, které vznikly zanucených větrových vln, když vítr ustal, nebo když vyšli z dosahu jeho působení. [3]
- Kmitové vlny – vlny vzniklé pohybem vodních částic v uzavřených drahách, kdy nedochází k přemísťování vody ve vodorovném směru; šíří se po hladině rychlostí  $c$ . [3]
- Smíšené vlny – vlny vznikající jako výsledek skládání vln vynucených a čerivých. [3]
- Odražené vlny – vlny vznikající při vzájemném působení vln a staveb částečným nebo úplným odražením vln od stavby s lícem strmějším než  $45^\circ$  a širším než je polovina délky vlny. [2]
- Interferované (křížené) vlny – vlny tvořící se skládáním částečně odražených vln s vlnami přicházejícími. [2]
- Stojaté vlny – zvláštní případ interferovaných vln. Tvoří se, přichází-li několik konstantních vln konstantní výšky a délky k objektu se svislou nebo strmou stěnou a jsou-li hřebeny vln rovnoběžné se stěnou. Jejich výška je dvojnásobná než výška vlny původní, délka zůstává stejná. [2]
- Příbojové vlny – vlny vznikající zdeformováním vln, přiblíží-li se za určitých hloubek k objektu; nesou na sobě stále nebo periodicky pěnu a přemísťují vodu směrem ke břehu. [2]
- Roztříštěné vlny – vlny vznikající tehdy, tříští-li se vlny o objekt při náhlé změně hloubky v těsné blízkosti objektu. [2]
- Vlny od pohybu plavidel:
  - *rozbíhavé* – vlny vznikající u přídě a zčásti u zádi lodi a šířící se pod ostrým úhlem směru pohybu lodi. [3]
  - *příčné* – vlny vznikající za kormidlem lodi a mající směr kolmý na směr pohybu lodi. [3]
- Soustava vln – řada postupových vln, které mají společný původ; u objektu či břehu se projevuje jako vlnobití. [2]

### 3.2.1 OSCILAČNÍ VĚTROVÉ VLNY

Oscilační vlny vznikající kmitáním vodních částic v uzavřených drahách, kdy nedochází k přemísťování vody ve vodorovném směru. [2]

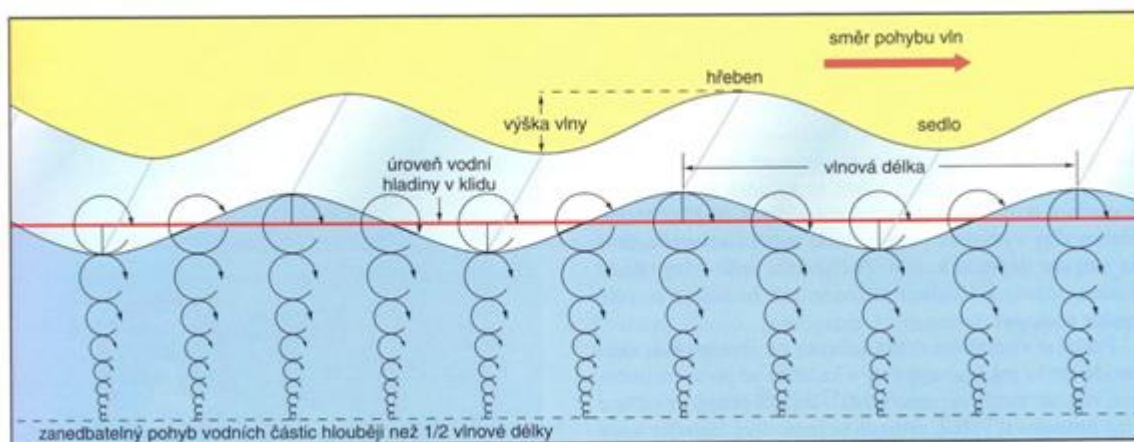
Při pohybu na hladině vody opisují jednotlivé částice kruhové dráhy. U částic na povrchu tento poloměr kružnice je rovný jedné polovině výšky vlny ( $r = h/2$ ). Směrem ke dnu nebo hlubokému pásnu vody se poloměr kruhové dráhy částice exponenciálně zmenšuje. [5]

### 3.3 PARAMETRY VLNY

Vlnění představuje pohyb vodních částic po uzavřených kruhu blízkých drahách. Příčinou vzniku všech vln je uvolnění energie.

Základními parametry vln (obr. 1) jsou:

- délka vlny – horizontální vzdálenost mezi dvěma hřbety,
- výška vlny – vertikální vzdálenost mezi nejvyšším bodem hřbetu a nejnižším bodem za ní následující vpadliny,
- perioda vlny – doba mezi přechodem dvou po sobě následujících hřbetů vln stejným bodem,
- rychlost vlny, jíž je podíl délky vlny a její periody. [6]



Obr. 1 Základní parametry vlny [6]

Výška vln je nejčastějším měřítkem jejich velikosti a spolu s tvarem slouží k poznání typu vlnění. Dalším ne méně významným parametrem je délka rozběhu čili velikost plochy vodní hladiny, na kterou vítr působí. [6]

#### 3.3.1 STANOVENÍ PARAMETRŮ VLNY

Charakter pohybu vln i stanovení jejich parametrů ovlivňuje ve velké míře hloubka vody v nádrži. Stanovením hraničního pásma mezi hlubokou a mělkou vodou se mimo jiné zabývali Dean a Eagjeson, kteří udávají následující rozdělení dle relativní hloubky [7]:

- Mělké nádrže, vznikající vlny jsou ovlivněny blízkostí dna. Vodní částice se pohybují po eliptických drahách (delší osa elipsy je ve směru pohybu vlnění). [7]

$$0 < \frac{H}{\lambda} < 0,05$$

- Vlny v přechodové zóně mezi hlubokou a mělkou vodou. Tato oblast bývá často přiřazována k zóně mělkovodní. [7]

$$0,05 < \frac{H}{\lambda} < 0,5$$

- Ohraničení velmi mělkého pásma. [7]

$$\frac{H}{\lambda} < 0,05$$

- Hluboká nádrž, jsou-li v ní podmínky pro vznik vln neovlivněných dnem. V hluboké nádrži se vodní částice pohybují po kruhových drahách s poloměrem  $r = h/2$  kde  $h$  = výška vlny. [7]

$$0,5 < \frac{H}{\lambda} < \infty$$

Kromě hloubky nádrže mají zásadní vliv na vznik a vývoj vlnění také základní charakteristiky větru (rychlost, směr, doba trvání), rozměry a tvar hladiny, délka rozběhu větru, tvar dna, sklon břehů a tvar území v okolí nádrže. [7]

Dále bude postupně uveden způsob stanovení parametrů větrových vln, a to v závislosti na znalosti předchozích charakteristik. [7]

Pro vlny vznikající v hlubokovodním pásmu platí:

$$\lambda_0 = \frac{g \cdot T_0^2}{2\pi} \cong 1,56 \cdot T_0^2,$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}} \cong 1,25 \sqrt{\lambda_0},$$



případně:

$$c_0 = \frac{g}{2\pi} \cdot T_0 \cong 1,56T_0$$

Pro vlny v přechodové zóně platí:

$$\lambda = \frac{g \cdot T_0^2}{2\pi} \operatorname{tgh} \frac{2\pi H}{\lambda_0}$$

(výpočet je prováděn iterací, v prvním kroku se bere hodnota  $\lambda_0$  – viz hlubokovodní pásmo, iterace probíhá, dokud není dosaženo požadované přesnosti  $\lambda_0 \cong \lambda$ ) [7]

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi} \operatorname{tgh} \frac{2\pi H}{\lambda}} \cong 1,25\lambda \sqrt{\operatorname{tgh} \frac{2\pi H}{\lambda}}$$

případně:

$$c = 1,56T_0 \cdot \operatorname{tgh} \frac{2\pi H}{\lambda}$$

Pro vlny v mělkém pásmu platí:

$$\lambda = 1,56T_0^2 \cdot \operatorname{tgh} \frac{2\pi H}{\lambda_0}$$

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi} \operatorname{tgh} \frac{2\pi H}{\lambda}}$$

(pro výpočet číselné hyperbolické funkce  $\operatorname{tgh}$  je vhodné pro danou hloubku  $H$  použít grafy dle ČSN 750255)

Pro vlny ve velmi mělkém pásmu platí:

$$\lambda = T_0 \sqrt{gH}$$

$$c = \sqrt{gH}$$

Pro uvedené vztahy platí:

c... postupová rychlost vlny [m.s<sup>-1</sup>]

g... tíhové zrychlení [m.s<sup>-2</sup>]

H... hloubka vody v nádrži [m]

λ... vlnová délka [m]

Pro periodu vlny platí:

$$T_0 = 0,46 \frac{w_{10}^{0,44} \cdot L_{ef}^{0,47}}{g^{0,72}},$$

$$L_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^{15} L_i \cdot \cos^2 \varphi_i}{\sum_{i=1}^{15} \cos \varphi_i}.$$

T<sub>0</sub>... perioda vlny [-]

w<sub>10</sub>... návrhová rychlost větru [m.s<sup>-1</sup>]

L<sub>ef</sub>... efektivní délka rozběhu větru [m]

Φ... úhel, který svírá i-tá radiála s hlavním směrem větru [°]

L<sub>i</sub>...délka i-té radiály [m]

### 3.3.2 VLNOVÁ DÉLKA

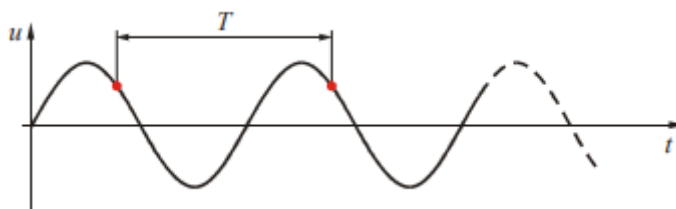
Mechanické vlny, mezi něž patří i vlny na vodní hladině se řídí Newtonovými zákony. Vlnová délka λ je nejmenší vzdálenost, na které dochází k opakování tvaru vlny v prostoru, je to tedy vodorovná vzdálenost dvou vrcholů sousedních vln.

### 3.3.3 VÝŠKA VLNY

Výškou vlny je vzdálenost mezi vrcholem a úžlabím. Amplituda vlny je velikost maximálního vychýlení veličiny

### 3.3.4 PERIODA VLNY

Perioda  $T$  je nejkratší doba, po které se průběh opakuje. Po uplynutí doby jedné periody  $T$  se cyklus opakuje, proběhl jeden kmit.



Obr. 2 Perioda vlny [8]

### 3.3.5 PERIODICKÉ SIGNÁLY

Funkce vln, které se analyzují, mohou být naměřené ve formě namáhání nebo napětí, které nazýváme zatížení, případně je můžeme označit i jinou veličinou. Předpokládáme, že nejdůležitější měřené zatížení jsou vlny na povrchu kapaliny. Signál je plně popsán časovým průběhem (tak jak je vidíme na záznamu z měření) a můžeme ho dělit na periodické a neperiodické. V obou případech je lze popsat spektrálně – určit jaké kmitočty v sobě obsahuje. Pro popis signálů bylo využito Fourierovy transformace. [9]

Použití Fourierovy transformace v analýze lineárních systémů je široce rozšířené a často vede k velké úspoře práce, pokud jsou používány metody s principem měření úhlové frekvence. Hlavním zjednodušením je, že integrační konvoluce metod časové domény se nahradí jednoduchým násobením. [9]

### 3.3.6 SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA VÝKONU

Spektrální hustota výkonu neboli výkon přenášený vlnou je nejdůležitější charakteristikou signálu ve frekvenční oblasti. [9]

Na spektrum signálu se lze dívat jako na funkci, která nám říká, jaká část výkonu je nesena, jakými frekvenčními složkami: je to funkce spektrální hustoty výkonu. Celkový výkon přenášený signálem se vypočítá jako integrál spektrální hustoty výkonu od  $-\infty$  do  $+\infty$ . [9]

Výkonné spektrum je dáno rovnicí  $S = (a_i^2 + b_i^2/2\Delta\omega)$ , kde  $\Delta\omega$  je vzorkovací interval ve frekvenční oblasti, tj.  $\omega_i = i * \Delta\omega$ . Dvoustupcová matice  $S(\omega_i) = (\omega_i, S_i)$  se nazývá spektrum

výkonu  $x(t)$ . V roce 1898 byl zaveden alternativní termín periodogram německým fyzikem Arthurem Schustrem. [9]

Sekvence  $\theta_i$  je taková, že  $\cos\theta_i = a_i/\sqrt{2 \cdot S_i \cdot \Delta\omega}$  a  $\sin\theta_i = -b_i/\sqrt{2 \cdot S_i \cdot \Delta\omega}$  se nazývá posloupnost fází. Fourierova řada je potom zapsána takto:

$$x(t) \approx m + \sum_{i=1}^N \sqrt{2S_i \Delta\omega} \cos(\omega_i t + \theta_i)$$

Poslední integrál se nazývá spektrální moment  $m_n$ . Podobně jako spektrální momenty vyšších řádů je dán vztahem:

$$m_n = \int_0^{+\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$$

### ***Gaussovy procesy ve spektrální oblasti***

V předešlé části kapitoly byly popsány vlastnostmi jednoho specifického signálu ve frekvenční oblasti. Předpokládejme nyní, že dostaneme řadu 3 měření signálu, které jsme ochotni považovat za rovnocenné prvním. Nicméně všechny tři série měření jsou zřídka kdy totožná a je přirozené tyto měření považovat za čistě náhodné. Měření na 3 místech bude mít rozdílné fáze a spektrum  $S(\omega)$ . Užitečným matematickým modelem pro takovou situaci je náhodná funkce (stochastický model), který bude označen  $X(t)$ . Pak  $x(t)$  je považován za konkrétní náhodně zvolenou funkci. Nejjednodušší model pro stacionární signál s pevným spektrem  $S(\omega)$ :

$$X(t) = m + \sum_{i=1}^N \sqrt{S_i \Delta\omega} \sqrt{2} \cos(\omega_i t + \theta_i)$$

kde  $\theta_i$  jsou fáze náhodné proměnné, nezávislé a rovnoměrně rozložené mezi 0 a  $2\pi$ . Ani to však není příliš realistický model, protože v praxi se sleduje variabilita amplitud spektra  $S(\omega)$  mezi měřenými funkcemi. Proto  $S_i$  by měly být také modelovány tak, aby zahrnovaly určitou náhodnost. Nejlepším způsobem, jak dosáhnout této realistické variability, je předpokládat, že existuje deterministická funkce  $S(\omega)$  tak, aby průměrná hodnota  $S(\omega_i)\Delta\omega$  v pozorovaných řadách mohla být aproximována  $S(\omega_i)\Delta\omega$ . Ve skutečnosti lze v mnoha případech modelovat variabilitu z  $S(\omega_i)$  jako:

$$s(\omega_i) = R^2 \cdot S(\omega_i)/2$$

kde  $R_i$  je nezávislý náhodný faktor s distribucí Rayleigh s pravděpodobností hustoty funkce

$$f_R(r) = r \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right), r > 0$$

To dává následující náhodnou funkci jako model pro sérii:

$$X(t) = m + \sum_{i=1}^N (\sqrt{S_i \cdot \Delta\omega} \cdot R_i \cos(\omega_i t + \theta_i))$$

Proces  $X(t)$  má mnoho užitečných vlastností, které lze použít pro analýzu. Zejména, pro každý pevný  $t$ ,  $X(t)$  je funkce normálně distribuována (Gaussovo rozdělení). Pak pravděpodobnost jakékoli události definované pro  $X(t)$ , lze vypočítat při známé průměrné hodnotě  $m$  a známé spektrální hustotě  $S(\omega)$ . [9]

## 4 ZPŮSOB MĚŘENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ

### 4.1 MĚŘÍCÍ TECHNIKA

#### 4.1.1 PONORNÁ SONDA

Ponorná sonda neboli ponorný tlakový senzor (snímač tlaku) je zařízení navrženo pro měření výšky hladiny. Senzor funguje na principu hydrostatického tlaku, proto je výška hladiny určena měřením tlaku pod hladinou. Je zaznamenávám dynamický tlak vyvolaný změnou výšky vody průchodnou vlnou a průměrný hydrostatický tlak způsobený vodním sloupcem pod úrovní hladiny vody.

Ponorné tlakové senzory se obvykle montují v konstantní hloubce na molo nebo plošinu ukotvenou ve dně oceánu. Montáž snímače hraje důležitou roli v kvalitě naměřených dat. Vzhledem k tomu, že senzory jsou v určité hloubce, rychlými změnami výšky hladiny moře nejsou malé vlny zaznamenány ve vodním sloupci. Při znalosti hloubky senzoru, tlaku zaznamenaným v časové řadě za použití lineární vlnové teorie může být přeměněn výpočet na náhorní plochu hladiny v čase. Tyto senzory se používají pro orientační měření. Směr vlny se těmito senzory zjistí kombinací více senzorů v jednom místě v určitých vzdálenostech od sebe. [10]

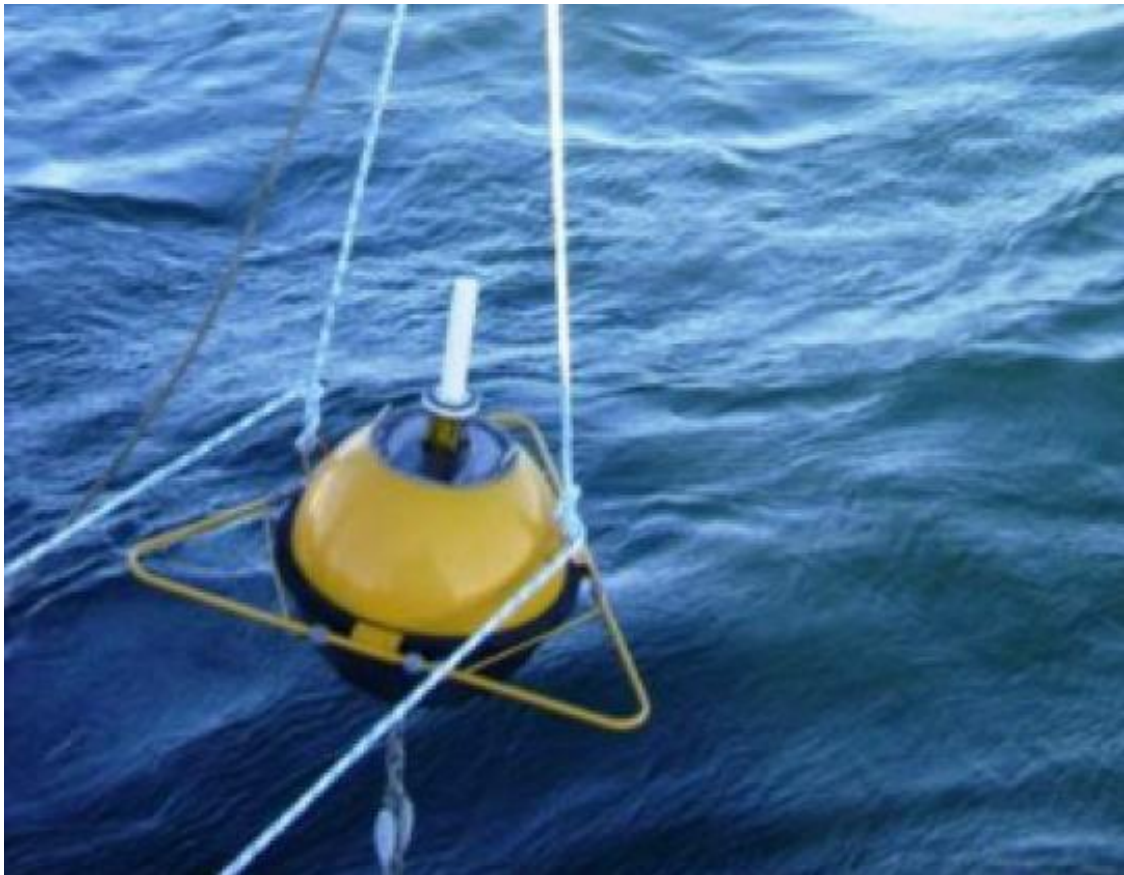
#### 4.1.2 BÓJE

Zařízení plovoucí na vodní hladině nesoucí měřicí zařízení. Zařízení slouží jako druh plavebního znaku k označení daného místa pro usnadnění plavby lodí. Bóje jsou vhodné pro měření v hlubokém pásmu vody, protože není potřeba je připevňovat k plošině či molu.

##### *Plovoucí bóje*

Kulové bóje o průměru menší než 1 m, sledují moře oběžné dráhy částic povrchové vody, se kterým se mohou měřit směrová a spektrální vlnová data. Aby mohly bóje zachycovat pohyb vlny, musí kotvení bóje umožnit pohybovat se volně. Instalace proto vyžaduje uvolněné kotvení bóje ke dnu. Obvykle se jako část použije elastická gumová šňůra. Počáteční posunutí bójí měří parametry vln pomocí akcelerometru, který změří vertikální posun povrchu moře. Bóje přenášejí vlnové informace na pobřežní stanici jako analogový signál pomocí rádiových frekvencí. Analogové informace vlny se zaznamenávají na přijímači jednotky v pravidelných intervalech po určité období pro pozdější analýzu. S těmito informacemi jsou získány spektra nesměrových vln. Tento způsob přenosu dat omezuje maximální vzdálenost bóje k pobřeží na

několik desítek kilometrů. Bóje, které sledují pohyb vlny používají pouze jeden výpočet akcelerometru vlnové výšky dvojitým integrováním vertikálního zrychlení. [10]



Obr. 3 Plovoucí bóje [10]

### *Těžké bóje*

Pro měření používá jednoosý akcelerometr s měřením osy kolmé k palubě bóje. Pro dokonalé sledování sklonu bóje je osa akcelerometru kolmá na povrch vlny. Spektrální analýzy jsou odvozeny z časových řad zrychlení. Naměřené zrychlení jsou opraveny frekvenčně v závislosti na reakci trupu bóje a jeho ukotvení. Pro odhad směrového vlnového spektra jsou měřeny časové řady (pitch and roll) – roztečí a rotace bóje. Naměřené časové řady se odkazují na směr východ-západ a sever-jih pomocí magnetometru, který získá azimut bóje z měření magnetického pole země. [10]



Obr. 4 Těžká bóje [10]

### ***GPS bóje***

GPS bóje jsou posuvné bóje, o velikosti i menší než půl metru. Mohou být volně pohyblivé nebo ukotvené ke dnu. Jsou to bóje bez čidla pouze s GPS přijímačem, kterým se mohou měřit směrová a spektrální vlnová data. Platforma musí mít speciální přijímač k získání informací z několika satelitů současně, aby bylo možné vypočítat jeho polohu. Protože signály GPS neprocházejí vodou, mohou být blokovány vysokými vlnami a někdy mohou být data ztracena. Většina bójí používá jediný přijímač GPS. Jejich metoda je založena na určení rychlosti pohybu bóje. Výpočet vychází z dopplerovského posunu frekvence přijaté na bóji. Rychlost bóje je pak integrovaný odhad jeho pohybu. Některé metody umístění bóje vyžadují diferenciální GPS strategii, která potřebuje na břehu další referenční stanici GPS. Použití této technologie je tedy omezené vzdáleností od pobřeží. [10]

#### **4.1.3 AKUSTICKÉ MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ**

Zařízení používané k měření směrových a spektrálních vlnových dat. Akustický převodník zařízení osazeného nad hladinou vody vysílá směrem dolů impulsy a měří dobu odrazu zvuku



od hladiny vody. Pro přesné měření je časový krok obvykle několikrát za sekundu. Naopak ponorný akustický měnič, který je pod hladinou pevně přichycen k plošině, je obrácen směrem k hladině. Impulsy vysílá směrem nahoru a měří dobu odrazu od hladiny vody. [10]



Obr. 5 Akustický senzor na měření vln [10]

### *Akustický Dopplerův proudový profilor*

Akustický Dopplerův proudový profil (ADCP) je hydroakustický měřič proudu podobný sonaru, kterým se mohou měřit směrová a spektrální vlnová data, slouží k měření rychlosti proudění vody v hloubce pomocí dopplerovského efektu zvukových vln rozptýlených zpět z částic ve vodním sloupci. Pro účely měření směrových vln se používá magnetický kompas a nakloněný snímač odkazující rychlosti měření na sever-jih a východ-západ. Metoda poskytuje měření jak směrových, tak i nesměrových vln. Zásadou této metody je že může měřit rychlosti v profilech, a zároveň odhadnout oběžné rychlosti vln pod hladinou vody. Rychlost je měřena pro několik buněk v různých hloubkách a poté je zpracována do sítě buněk odkud jsou získány směrové informace. Pro převod dat z rychlosti spektra na plošný posun se využívá teorie lineárních vln. Pro zpřesnění teorie lineárních vln se využívá snímače tlaku, který měří

průměrnou hloubku vody. Zároveň slouží jako druhý zdroj pro statistiku nesměrových vln. [10]

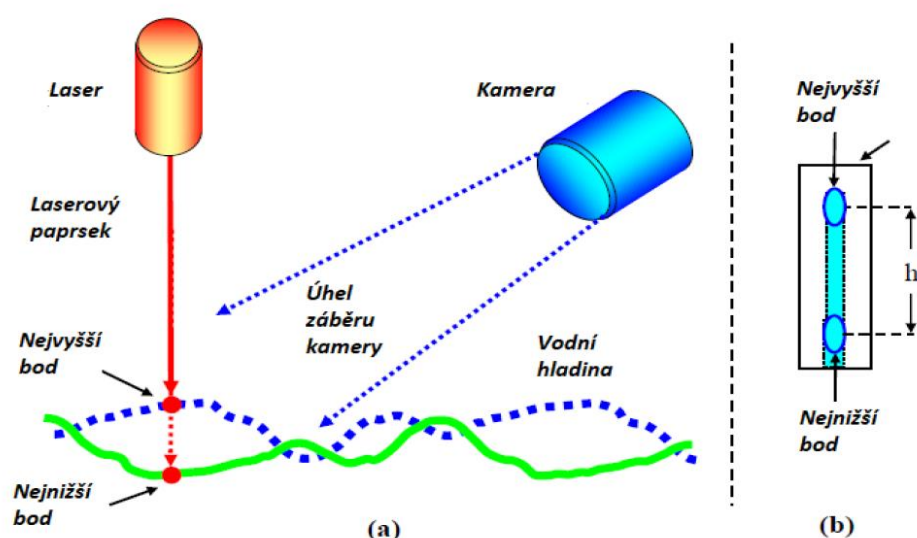
#### 4.1.4 RADAROVÉ SENZORY

Radary používají jako snímač rádiovou anténu směřující dolů připevněnou na plošně poblíž pobřeží o několik metrů výše, než je maximální úroveň dosažitelná vlnami. Radarová vlna putuje směrem dolů a měří dobu odrazu zvuku od hladiny vody. V tomto případě radar vysílá elektromagnetickou vlnu, jejíž rychlost je mnohem vyšší než rychlost zvuku ve vzduchu. Jelikož je čas letu velmi krátký musí být elektronika mnohem přesnější a sofistikovanější. [10]

S radarovými senzory se podobně jako u akustických zařízení měří směrová a spektrální vlnová data.

#### 4.1.5 OPTICKÁ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

System sestává z laserového zdroje, jehož paprsek je instalován vertikálně a směřující dolů na vodní hladinu. Zorné pole kamery svírá určitý úhel s paprskem laseru. Relativní poloha laseru a kamery je konstantní díky tomu, že jsou nainstalovány na stejném rámu. Laserový paprsek vytváří místo na vodní hladině a kamera zaznamenává jeho odrazy, jak se voda pohybuje. Jelikož se paprskové světlo nejenom odráží ale část světla je pohlcena podpovrchovou vodou, není zaznamenaný odraz dostatečně ostrý, ale rozptýlený. Po statistickém zpracování snímků je povrchová plocha odhadnuta. [10]



Obr. 6 princip měření optickým zařízením

#### 4.1.6 KAPACITNÍ SNÍMAČ

Přístroje označované jako kapacitní snímače slouží k měření hladiny na hydraulických modelech a v terénu, se kterým se mohou měřit směrová a spektrální vlnová data. Vlastní snímač sestávající z kovové tyče nebo drátu pokryté pláštěm z elektrického izolátoru. Obvykle je drát vyroben z mědi a elektrický izolátor z teflonu. Aby byl přenos informací lineární, musí být izolátor v celé délce konstantní tloušťky. Stejně jako u odporového senzoru by měl být použit nějaký mechanismus pro napínání drátu. Vnitřní drát je jednou z elektrod kondenzátoru. Druhá elektroda může být buďto druhý neizolovaný drát, umístěný v blízkosti prvního, nebo to může být samotná voda, která je závislá na elektrickém potenciálu nádrže. Ve druhém případě je kapacita  $X$  mezi vnitřní elektrodou a vodou dána vztahem:

$$C = Kh$$

kde  $K$  je konstanta, která zahrnuje průměr drátu, elektrický izolátor a permitivita dielektrika, vyjadřující míru odporu při vytváření elektrického pole v určitém přenosovém médiu a  $h$  je ponořená hloubka senzoru. Kapacita je tedy úměrná hladině vody. Některé elektronické obvody, které jsou vhodné pro měření kapacitní impedance, se používají k převodu změn kapacity na napětí. Výstupní napětí reprezentuje výšku vody. Obecně se pro buzení senzorů používají signály v rozsahu radiových frekvencí. Kapacitní snímač díky buzení průměrně měří úroveň na určené oblasti drátu nebo tyče. Velikost této oblasti integrujícího povrchu, a tedy prostorového průměrování není určen ve specifikacích výrobců. Teoreticky velikost této oblasti závisí na prostorovém rozložení elektromagnetického pole v reálném distribuovaném kondenzátoru. Pro dosažení vysokých hodnot kapacity, které jsou méně náchylné na šum, se izolátor vyrábí obvykle tenký. Při takovéto tloušťce je izolátor náchylný na poškození. Dynamická reakce vln může být také omezena vodním meniskem na sondě na rozhraní voda-vzduch. Když voda padá kolem zařízení, na povrchu sondy vzniká fyzikální jev nazvaný zvlhčení sondy, který může prodlužovat délku než samotný meniskus. Toto fyzické chování vytváří nízkopřechodový filtr vlny. Zvlhčování je fenomén, který vyplývá z působení soudržnosti a adhezní síly působící na molekuly kapaliny v blízkosti pevného povrchu. Soudržné síly jsou vyvíjeny molekulami v kapalině, zatím co adhezní síly jsou vyvíjeny molekulami pevného povrchu. Vzhledem k tomu, že kapaliny nemohou přenášet smykové napětí, výsledná síla mezi soudržnými a adhezivními silami musí být normální vůči povrchu kapaliny v místě styku s pevným povrchem. Úhel, který dotyková čára svírá s povrchem kapaliny v místě styku s pevným povrchem se nazývá kontaktní úhel. Kontaktní úhel je malý a říká se, že kapalina vlhčí povrch, jsou-li adhezní síly větší než kohezní. Naopak, je-li kontaktní úhel velký, kapalina nezatahuje povrch. Malé množství příměsí, jako např. zvlhčovač, detergenty a hydroizolační činidla, mohou způsobit velké rozdíly v kontaktním

úhlu. Pro správné výsledky by mělo měření probíhat za konstantní citlivosti a konstantní teploty. [10]

#### 4.1.7 ODPOROVÝ SNÍMAČ

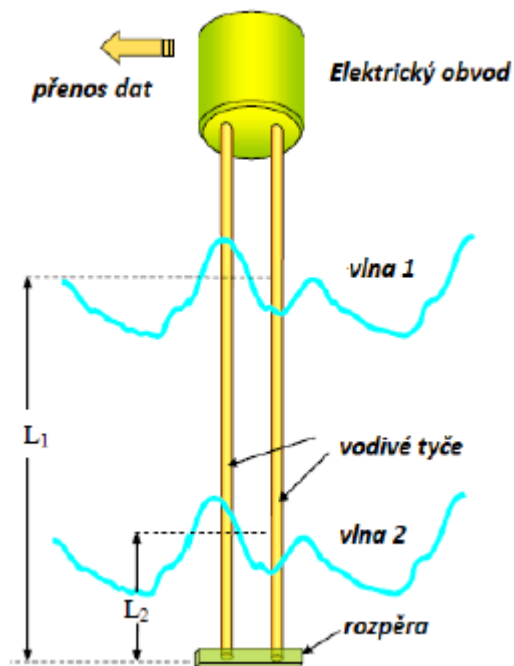
Odporový (vodivý) snímač slouží k měření vln na hydraulických modelech a nádržích, se kterým se mohou měřit směrová a spektrální vlnová data. Snímač hladiny je sestaven ze dvou vertikálních vodivých tyčí nebo drátů, obecně vyrobených z nerezové oceli. Snímač má hlavu obsahující elektronické obvody a zahrnuje přenosovou linku na centrální stanici, která je odpovědná za získání signálu z několika senzorů. Tyče jsou ponořeny v určité hloubce a jsou zajištěny rozpěrou na spodním konci, která zajišťuje tyče v konstantní vzdálenosti a zajišťuje konstantní geometrii. Elektrický obvod měří odpor tyčí a vodu. Protože odpor tyčí a konstanta jsou nízké, tak změna odporu jako „zaznamenaná“ je způsobená okruhem v důsledku změny výšky vody. Naměřený vodní elektrický odpor je dán vztahem:

$$L = c/L\sigma$$

kde  $L$  je délka ponoření tyčí,  $\sigma$  je vodivost vody a  $C$  je konstanta, která závisí na průměru a vzdálenosti mezi tyčemi. Tato rovnice platí od určité vzdálenosti od spodního konce snímače 5 až 10 % délky prutů. Bližší k dolnímu konci vztah mezi odporem a výškou vody již není lineární. [10]

Změna odporu měřená elektronickým obvodem je nepřímo úměrná výšce vody. Když snímač změří hodnotu "vlna 2" (obr. 3), odpor vody "zaznamenaný" elektronickým obvodem je  $R_2$ ; když se hladina vody se zvýší na hodnotu "Vlna 1", odpor je  $R_1$  a  $R_1 < R_2$ . Snížení odporu vzniká, protože když jsou pruty ponořeny přidává se paralelně určitý počáteční odpor  $R_2$ . Hodnota ekvivalentního odporů dvou paralelně zapojených rezistorů je vždy menší než menší z obou odporů. To je důvod proč se odpor snižuje s nárůstem hladiny vody. Naměřený odpor a pak napětí je průměr vlny mezi tyčemi. Když je vrcholová délka vlny vody srovnatelná se vzdáleností mezi tyčemi, snímač funguje jako dolní prostorový senzor pro naměřené vlny. Pokud se senzory používají v nádrži, kde vlny cestují jen jedním směrem, je vhodné minimalizovat prostorové průměrování snímače pouze na jeden směr. Řešením je instalace roviny obsahující tyče paralelně na přední stranu vlny. Tyto kapacitní senzory také trápí problém menisku a zvlhčování popsané v kap. 4.1.6. Vzhledem k tomu, že odpor je nepřímo úměrný výšce vlny, a my chceme, aby výstupní napětí bylo přímo úměrné výšce vlny, musí se využít některých jednoduchých elektronických obvodů. Běžně se používají střídavé signály v rozsahu zvukových obvodů. Obecně platí, že u hydraulických modelů se používá čistá voda a vodivost vody tedy může být považována za konstantní při krátkodobých zkouškách. Změny

ve vodivosti  $\sigma$  lze řídit kalibrací před a po každém měřicím cyklu. V některých případech, kde se během zkoušky změní vodivost  $\sigma$  se využívá kompenzačního obvodu, který měří vodivost vody současně s výškou vlny. Kalibrace sond se realizuje zvýšením nebo snížením jejich ponorné hloubky a zároveň měřením jejich výstupního napětí. Kontaminanty ve vodě, například jako olej, mohou mít významný vliv na kalibraci. [10]



Obr. 7 Odporový snímač [10]

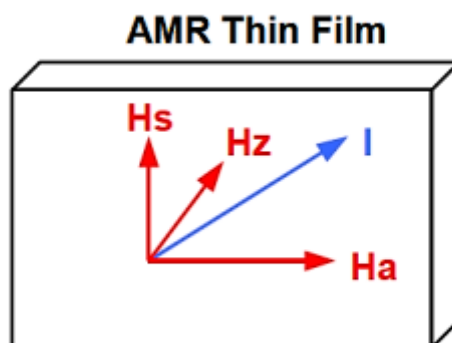
### **AMR senzor**

AMR neboli Anizotropní MagnetoRezistence je jev, při kterém dochází ke zvýšení rezistence (odporu) materiálu vlivem vnějšího magnetického pole. Anizotropní rezistence závisí na směru proudícího materiálu.

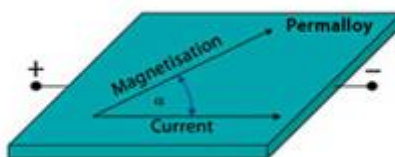
Základem funkce AMR senzoru je již zmíněný AMR jev, tedy změna elektrického odporu velmi tenké vrstvy slitiny železa a niklu (permalloy) při jeho vložení do podélného magnetického pole. Změna odporu nastává již při velmi malých hodnotách indukce magnetického pole v řádu jednotek mikroT až mT a s rostoucí hodnotou pak obvykle odpor rychle a téměř lineárně klesá. Ale pouze o cca 2-3 % hodnoty původního odporu materiálu v klidovém stavu bez přítomnosti magnetického pole. Pak se již s rostoucí silou magnetického pole dále nemění. Konkrétní snímací rozsah AMR senzoru je pak dán konkrétním „nastavením“ snímacího elementu (tvar, rozměry, složení). Mimo samotné intenzity magnetického pole má významný vliv i směr pole vzhledem k orientaci snímacího elementu.

Konkrétně v klidovém stavu jsou magnetické domény nasměrovány ve směru delší strany AMR elementu (obr. 4). Když na element působí magnetické pole ve směru kolmém (směr  $H_s$ ), také domény elementu se natočí z klidové pozice  $H_a$  na „snímací“ pozici ve směru  $H_s$ . Směr domén pak má vliv na velikost protékajícího elektrického proudu elementem, tedy na el. odpor. Velikost proudu je úměrná druhé mocnině sinu úhlu mezi vektorem proudu a aktuálním vektorem mag. pole. Tedy pokud je směr proudu shodný s vektorem mag. pole, el. odpor je maximální, pokud je vektor pole kolmý na směr proudu, je odpor minimální. Směr proudu vzhledem k AMR elementu pak je definován pozicí kontaktních elektrod (obr.5).

V praxi se proto někdy na snímací element implantují kontaktní plošky v podobě diagonálních metalických proužků, čímž je v klidovém stavu směr proudu v permalloy slitině vychýlen o  $45^\circ$  proti klidovému stavu mag. domén. [11]

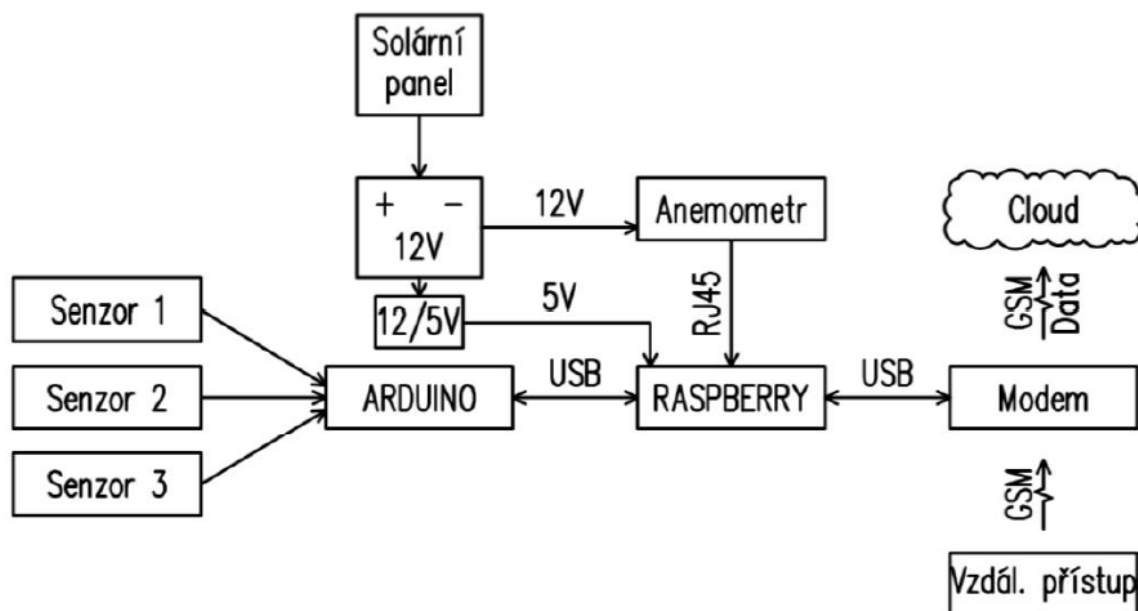


Obr. 8 AMR element [11]



Obr. 9 Závislost odporu na intenzitě magnetického pole permalloy proužku [11]

## 4.2 POPIS ZAŘÍZENÍ SYSTÉMU PRO MĚŘENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ



Obr. 10 Blokové schéma systému sběru a přenosu dat

### 4.2.1 SBĚR A ZÁKLADNÍ ZPRACOVÁNÍ DLOUHODOBĚ ZAZNAMENÁVANÝCH DAT

Raspberry Pi2 – centrální jednotka

Arduino UNO – jednotka sběru dat: výšková úroveň vodní hladiny v nádrži

Milone eTape Liquid Level Sensor – čidla pro kontinuální snímání výškové úrovně vodní hladiny v nádrži (3 ks)

Anemometr – jednotka sběru dat: směr a rychlost větru

WindETH – komunikační prvek pro sběr dat z anemometru

USB kamera – vizuální kontrola systému

#### *Operační systém Raspberry Pi2*

Raspbian je operační systém odvozený z Debianu pro Raspberry Pi i osobní počítače. Je oficiálně poskytován nadací anglicky Raspberry Pi Foundation jako primární operační systém pro jednodeskové počítače z rodiny Raspberry Pi. Raspbian. Byl vytvořen Mikem Thompsonem a Peterem Greenem jako nezávislý projekt. První sestavení (tzv. build) byl dokončen v červnu 2012.

System je v aktivním vývoji, Raspbian je vysoce optimalizovaný pro ARM procesory užívané v Raspberry Pi. Raspbian používá jako hlavní desktopové prostředí PIXEL; zkratka z anglického anglicky Pi Improved Xwindows Environment, Lightweight. PIXEL se skládá z modifikovaného prostředí LXDE a správce oken Openbox.

Model „B“ byl uveden do prodeje v únoru 2015. Jeho základem je SoC BCM2836 z rodiny ARM Cortex-A7 od firmy Broadcom, který obsahuje čtveřici procesorových jader s taktom 900 MHz, posílenou jednotkou SIMD a 1 GiB paměti RAM. Osazen je grafickým procesorem VideoCore IV, podporující OpenGL ES 2.0, 1080p30, MPEG-4. Obsahuje slot pro microSD kartu, čtyři porty USB 2.0, ethernetový adaptér 10/100 Mbit/s s konektorem RJ-45. Pracovní napětí 5 V.

Raspberry Pi2 běží v tomto případě na Raspbian GNU/Linux 9 (stretch) ta běží na architektuře ARM – systém je derivací Linux Ubuntu lokální. Data jsou uložena na paměťové kartě na Raspberry Pi2 (32 GB). [18]



Obr. 11 Centrální jednotka Raspberry Pi2 [19]

## *Arduino UNO*

Arduino je v názvu malého jednodeskového počítače založeného na mikrokontrolerech ATmega od firmy Atmel. Je hojně využíván pro řízení jednoduchých elektrických obvodů. Platforma je určena pro čtení hodnot širokého spektra čidel na základě programového kódu, založeného na jazyku C++. Arduino je v systému odpovědné za sběr dat ze snímačů vodní hladiny v definované frekvenci. Zde je čteno ze 3 GPIO pinů.

Mikrokontroler: ATmega328P

Pracovní napětí: 5 V

Flash paměť: 32 kB



SRAM: 2 kB

Processor: 16 MHz [18]



Obr. 12 Řídící jednotka sběru dat kolísání vodní hladiny Arduino UNO Rev3 [19]

### *Snímač úrovně hladiny-Milone eTape Liquid Level sensor*

Sběr dat kolísání hladiny byl zajištěn čidly Milone eTape Liquid Level Sensor. Jednalo se o polozatopený snímač výškové úrovně hladiny na bázi elektrického odporu namísto mechanického plováku.

Pro účely modelování prostorového spektra vlnění byla v nádrži na podpurné konstrukci zafixována tři čidla ve vzájemné vzdálenosti 0,5 – 1,0 m, která synchronizovaně kontinuálně snímala úroveň hladiny. Pro detailní zachycení tvaru postupujících vln byla zvolena frekvence zápisu dat 10 Hz (= perioda 100 ms) – naprogramováno v mikrokontroleru Arduino. Jeden řádek datového záznamu obsahuje časovou značku a hodnoty odporu ze tří čidel. V navazující fázi zpracování dat budou hodnoty odporu (případně surové hodnoty analogového signálu) přepočteny dle kalibrační rovnice na úroveň zatopení čidel v cm, respektive na absolutní hodnotu nadmořské výšky.

Čidla byla výškově umístěna tak, aby byla stále částečně zatopená, tzn. v kontaktu s hladinou. Výhodou lokality je poměrně stabilní úroveň hladiny vody v nádrži, která je dotována pouze vodou podpovrchovou, bez stálého přítoku. Délka čidel musí být dostatečná, aby nedošlo především k jejich přelití, což by mělo za následek dočasný výpadek snímaných hodnot.

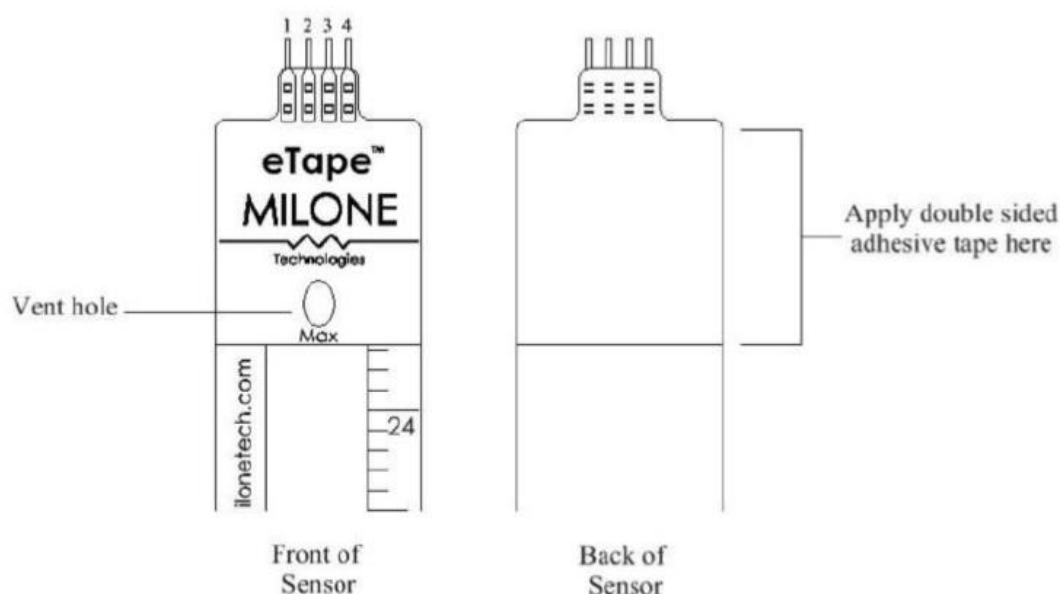
Vzhledem k předpokládanému umístění systému v nádrži, rozměru a tvaru nádrže, převládajícího směru a návrhové rychlosti větru byl proveden orientační předběžný odhad parametrů vlnění (charakteristická výška vlny  $H$ , perioda  $T$ ). Čidla byla vyrobena v délce 250 cm, což je vzhledem k výše uvedeným skutečnostem dostatečné. Proti mechanickému poškození budou čidla umístěna uvnitř perforovaných plastových trubek  $\varnothing 27$  mm.

Délka: 250 cm

Šířka: 25,4 mm (1'')

Tloušťka: 0,4 mm

Konektor: crimpflex pin – samec [18]



Obr. 13 Detail části odporového čidla

#### 4.2.1.1.1 Technické problémy

Po spuštění provozu byla zjištěna nefunkčnost odporových čidel pro snímání pohybu hladiny ve vodní nádrži. Z výstupních hodnot bylo zřejmé, že čidla nereagují na změnu výškové úrovně hladiny. Konstruktivním řešením čidel je tenký, poměrně subtilní odporový plastový pásek. Ochrana proti hrubému poškození byla zajištěna fixací pásků v plastových hustě perforovaných trubkách (následně v hliníkových profilech) tak, aby zůstaly v dostatečném kontaktu s hladinou bez ovlivnění. Z uvedeného vyplývá, že čidla musejí zůstat vždy v kontaktu s vodou a pravděpodobně došlo k průniku vody mikrotrhlinami přímo do pásku čidel. Z povahy konstrukčního a materiálového řešení čidla není možné obdobná poškození opravit. Další možnou příčinou je silné usazování jemných částic na předměty a konstrukce umístěných ve stálém kontaktu s vodní hladinou. Přesnou příčinu problému se nepodařilo identifikovat. Přestože byla typově obdobná odporová čidla úspěšně odzkoušena v

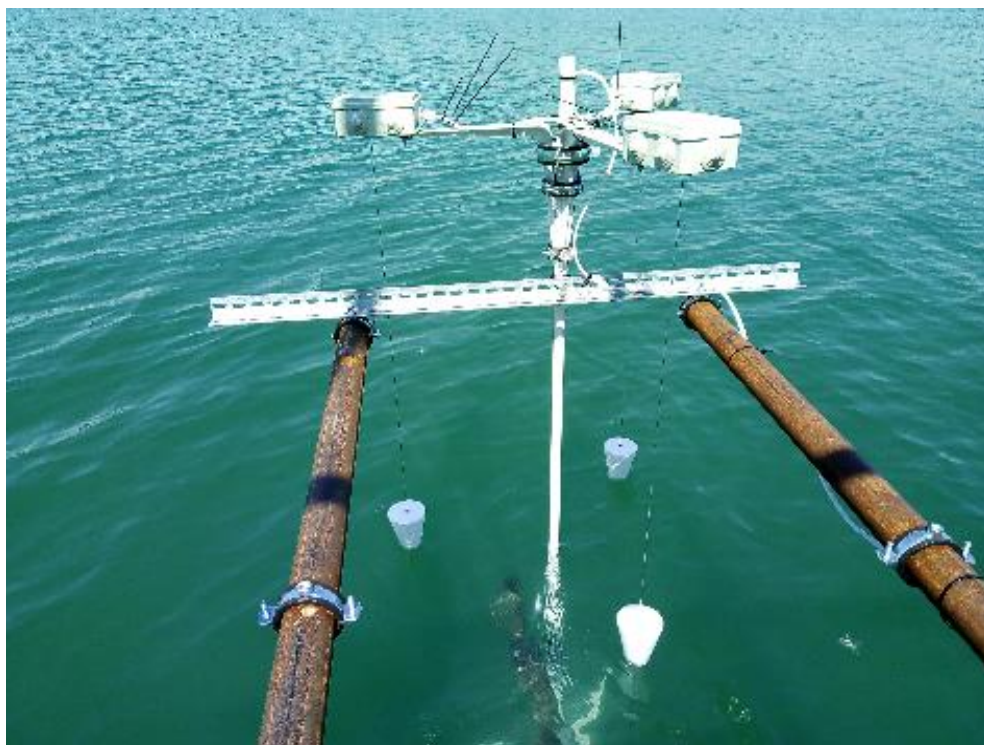
laboratorních podmínkách a využívána při terénních měřeních na vodních nádržích od r. 2014, v rámci zařízení na nádrži Hulín, selhala. Řešitelé tedy považují odporová čidla ve formě subtilních pásků do extrémních podmínek větrových, resp. vlnových událostí jako nevhodné vzhledem k vysoké mechanické zátěži způsobených vlnami. [18]

#### 4.2.1.1.2 Řešení

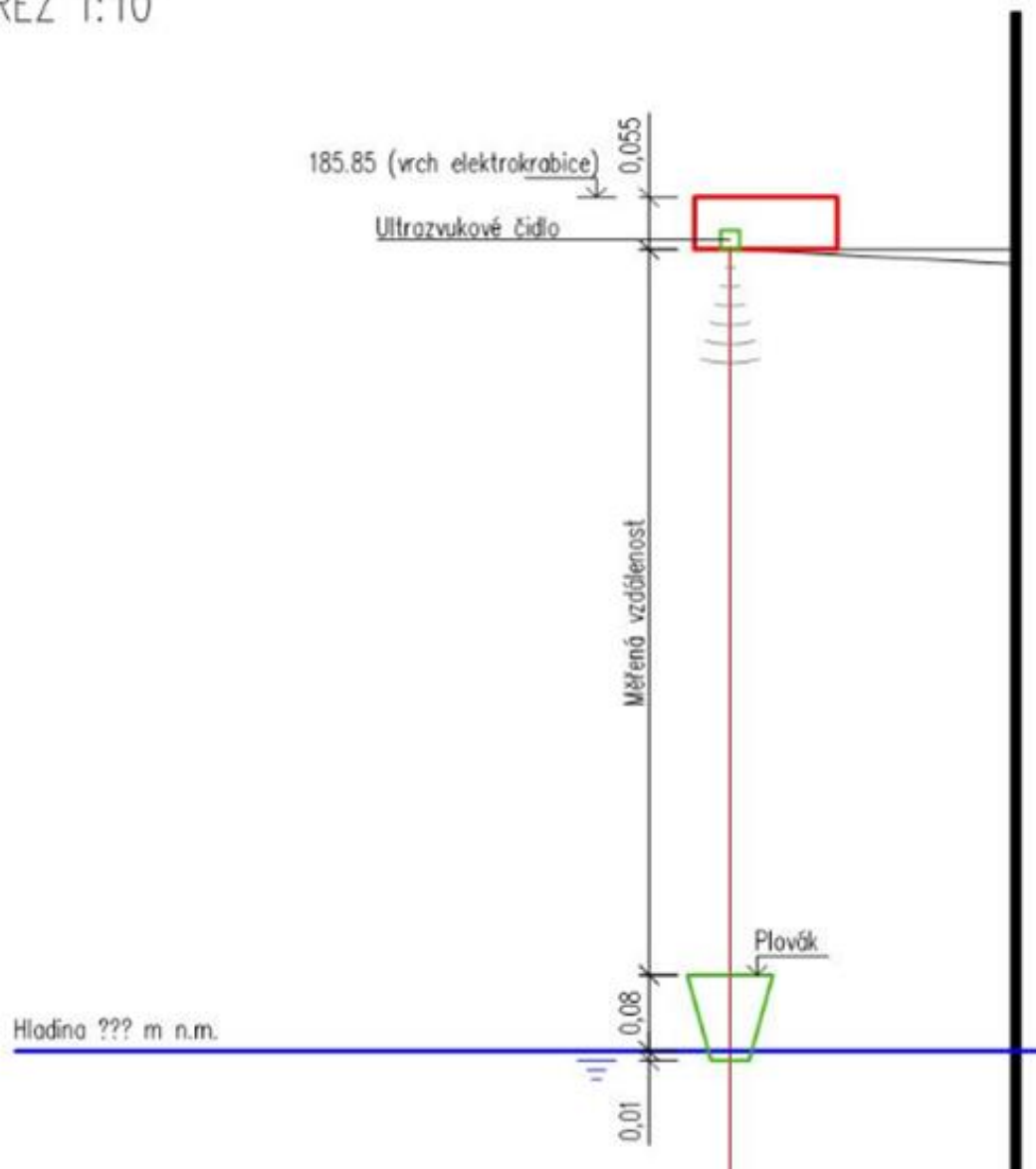
Řešením problému byl návrh nového konstrukčního řešení čidel, založeného na odlišném principu snímání hladiny. Vzhledem k neměnným požadavkům na výstupní data, tzn. především na frekvenci snímání a přesnost, byl operativně navržen systém čidel, který pracuje na kombinovaném principu mechanicko-ultrazvukovém. Jedná se o trojici ultrazvukových čidel, kontinuálně snímajících vzdálenost příslušných plováků, pohybujících se pouze ve vertikálním směru díky napnutým vodícím lankům. Systém čidel je fixován pouze na jednom tyčovém prvku, proto se celkově zjednodušilo i uchycení na samotnou pracovní plošinu.

Systém čidel je v provozu bez problémů.

V souvislosti s výměnou čidel bylo provedeno geodetické zaměření osazení čidel a pracovní plošiny pro účely přepočtu snímaných hodnot změny úrovně hladiny v důsledku vlnění na nadmořskou výšku. [18]



Obr. 14 Čidla pro snímání pohybu hladiny [18]

DETAIL ČIDLA (2020-07-08 12:00h)  
ŘEZ 1:10

Obr. 15 Schéma principu snímání hladiny [20]

Pozice čidel:

čidlo 1  $x=-536183.8833$   $y=-1155699.6127$   $z=185.702$

čidlo 2  $x=-536184.2080$   $y=-1155700.0600$   $z=185.702$

čidlo 3  $x=-536184.4242$   $y=-1155699.5595$   $z=185.692$

## *Anemometr*

WindETH je Ethernetový anemometr, který umí měřit směr a rychlost větru. Aktuálně naměřené hodnoty jsou dostupné přes interní webové rozhraní WindETH nebo v různých strojově čitelných formátech jako je HTTP GET, XML, MODBUS TCP, SNMP a Spinel. Při překročení mezí umí WindETH upozornit obsluhu e-mailem – v tomto případě je využito čtení XML. WindETH obsahuje senzor a oddělenou elektroniku, která se připojuje k Ethernetu a napájení (napájecím zdrojem je v tomto řešení fotovoltaika). Anemometr je přímo propojen s centrální jednotkou Raspberry Pi2.

Snímání rychlosti větru: mechanické – miskový anemometr

Směr větru – počet poloh: 16 v rozsahu 360°

Rozsah rychlosti: 0–50 m·s<sup>-1</sup> (přesnost 0,1 m·s<sup>-1</sup>)

Konektor: RJ45

Napájení: 7–30 V

Proudový odběr při 12 V: 90 mA

Komunikace: Ethernet [18]



**Obr. 16 Anemometr WindETH [19]**

## ***USB kamera***

Vizuální kontrola systému je možná pomocí webkamery s HD rozlišením 1280 x 720 bodů, rychlost snímání až 30 obrázků/vteřinu, fotografie 3,7 Mpx, rozhraní USB 2.0, délka kabelu 1,5 m. [18]

### **4.2.2 PŘENOS DAT**

Modem USB – komunikační prvek pro odesílání dat

Anténa pro GSM – komunikační prvek pro odesílání dat

#### ***Modem USB***

Modem USB je ovládán přes Sakis3G. Jedná se o vylepšený shellový skript, který pracuje na vytvoření připojení 3G/LTE s libovolnou kombinací modemu nebo operátora. Automaticky nastavuje modem USB a potom pomocí zavedení do systému, může dokonce detekovat nastavení operátora. Modem USB je nastaven tak, že se podle profilu automaticky po restartování zapne.

Při výpadku napájení se znovu nastartuje (tato kontrola je prováděna každou hodinu).

Modem USB (ID 12d1:1520 Huawei Technologies Co., Ltd. K3765 HSPA) se SIM kartou Vodafone.

CTD-200 Dual USB Modem USB modem podporující technologie HSPA/EDGE/GPRS a CDMA EVDO rev A. Rychlost přenosu dat až 7,2 Mb/s pro HSPA a 3,1 Mb/s pro CDMA. [18]

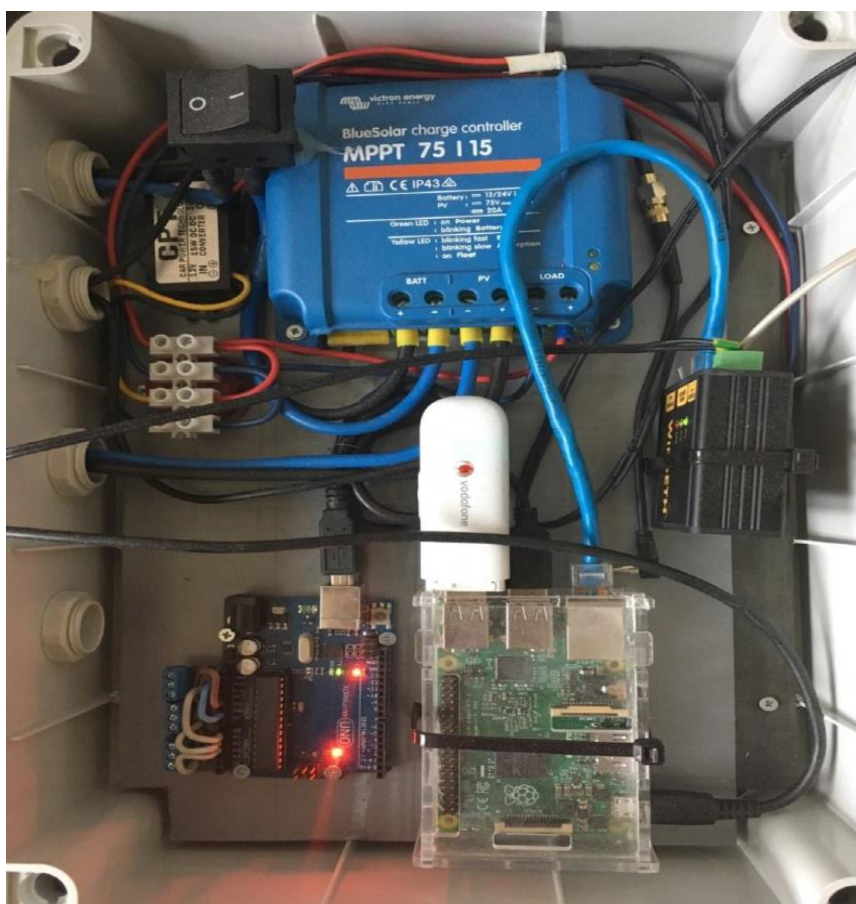
### **4.2.3 SYSTÉM NAPÁJENÍ**

Zdrojem elektrické energie pro provoz systému je baterie Banner 80Ah, dobíjená solárním panelem BlueSolar 80Wp. Kapacita baterie a výkon panelu byl zvolen na základě orientačně stanovené spotřeby elektrické energie celého systému při běžném provozu a průměrné délce slunečního svitu v jednotlivých měsících pro lokalitu Hulín. V zimních měsících se sběr dat nepředpokládá kvůli krátkému dennímu slunečnímu svitu a možnému mechanickému poškození čidel v důsledku zámrazu vodní hladiny.

Součástí napájení je regulátor BlueSolar MPPT 75/15 – připojení USB kabelem VE.Direct. Zařízení VictronConnect lze použít k upgradu firmwaru a konfiguraci řadiče MPPT a sledování výstupu hodnot, délka kabelu 1,5 m. Pro účely napájení centrální jednotky Raspberry Pi2 je zabudován převodník napětí 12/5 V. [18]



Obr. 17 Solární panel BlueSolar 80Wp [19]



Obr. 18 Uložení řídicích jednotek systému v plastovém boxu [21]

#### 4.2.4 VZDÁLENÝ PŘÍSTUP

Pro online přístup jsou navržena dvě záložní řešení, na sobě nezávislá. [19]

##### *VNC CONNECT – primární řešení*

VNC je zkratka anglického Virtual Network Computing. Jde o grafický program, který umožňuje vzdálené připojení ke grafickému uživatelskému rozhraní prostřednictvím lokální sítě nebo sítě Internet. VNC pracuje v režimu klient-server, kdy server vytváří grafickou plochu a prostřednictvím sítě komunikuje s klientem, který si plochu zobrazuje.

Pro komunikaci se používá protokol RFB (remote frame buffer), jehož cílem je minimalizovat objem přenášených dat mezi klientem a serverem

Přihlašování: email + heslo [19]

##### *TeamViewer – sekundární řešení*

Nástroj pro přístup na vzdálenou plochu. Jde o grafický program, který umožňuje vzdálené připojení ke grafickému uživatelskému rozhraní prostřednictvím lokální sítě nebo sítě Internet. TeamViewer pracuje v režimu klient-server, kdy server vytváří grafickou plochu a prostřednictvím sítě komunikuje s klientem, který si plochu zobrazuje. Funguje bezproblémově skrze NAT, což je díky tomu, že spojení se navazuje přes TeamViewer servery.

Přihlašování: email + heslo [19]

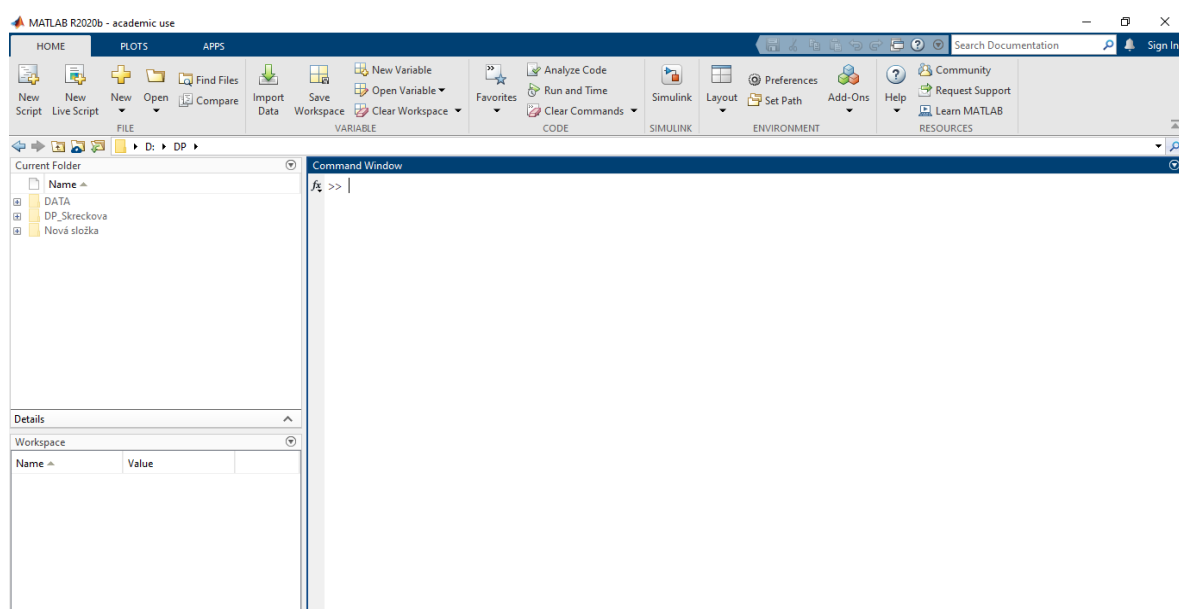


## 5 ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘÍČÍHO SYSTÉMU

Data byla zpracována v programu MATLAB s WAFO toolboxem.

### 5.1 MATLAB

MATLAB<sup>®</sup> je programovací platforma navržená speciálně pro inženýry a vědce. Srdcem MATLABu je jazyk MATLAB, jazyk založený na matici, který umožňuje nejpřirozenější vyjádření výpočetní matematiky. Pomocí MATLABu lze analyzovat data, vyvíjet algoritmy, vytvářet modely a aplikace. Lze jej použít pro celou řadu aplikací, včetně hlubokého učení a strojového učení, zpracování signálu a komunikace, zpracování obrazu a videa, řídicích systémů, testů a měření, výpočetních financí a výpočetní biologie. Jazyk, aplikace a integrované matematické funkce umožňují rychle prozkoumat více přístupů a dospět k řešení. [21]



Obr. 19 Prostředí MATLABu

### 5.2 WAFO

WAFO je sada nástrojů MATLABu pro statistickou analýzu a simulaci náhodných vln a náhodných zatížení. [22]

Obsahuje nástroje pro analýzu únavy (predikce únavového života pro náhodné zatížení, teoretická hustota cyklů dešťových toků), mořské modelování (imulace lineárních a nelineárních Gaussových vln, odhad frekvenčních spekter a spekter směrových vln, aj.),

statistiku (analýza extrémní hodnoty, vícerozměrné gaussovské pravděpodobnosti a očekávání, aj.) a numeriku (deriváty, integrace, vyhlazování spline). Sada nástrojů obsahuje také skripty pro generování grafů v některých publikacích a skripty pro srovnání s výsledky v literatuře. Zahrnutý jsou soubory dat z měření mořské hladiny. [22]

### 5.3 M-SOUBOR

M-soubor je textový soubor s příponou .m, který obsahuje posloupnost příkazů a povelů pro výpočet v programu MATLAB. Tento textový soubor lze vytvořit v libovolném textovém editoru, který do dokumentu nepřidává žádné formátovací informace. Pro zpracování dat byl vytvořen základní skript. Skript je ten nejjednodušší typ M-souboru. Jedná se o pouhý seznam příkazů a povelů MATLABu obsahující import a načtení dat jejich seřazení do matice s výpočtem a výstupem.

#### 5.3.1 FUNKCE M-SOUBORU

##### *Načtení dat*

Po spuštění programu MATLAB je potřeba importovat data, Za pomoci nástroje Import Data lze importovat z textového .txt i z excelovského dokumentu .xls. Proměnnými jsou na čidlech naměřené hloubky  $w$  v čase  $t$ . U časového formátu  $t1$ ,  $t2$  a  $t3$  byl nastaven Output Type Column Vector a u výšek  $w1$ ,  $w2$  a  $w3$  jako Numeric Matrix. Hloubky jsou přepočteny na  $m$ .

```
%% z w udelat hladiny
h1=185.691-w1/100;
h2=185.703-w2/100;
h3=185.693-w3/100;
```

Obr. 20 Přepočet výšek v M-souboru

##### *Tvorba matice*

Pro další výpočty odhadu spektra je zapotřebí upravit data do matice  $W = [tt \ hw1 \ hw2 \ hw3]$ . V této části je zapotřebí synchronizovat časy na jeden absolutní pomocí lineární interpolace a poté převést na sekundy. A vypočítat výšky vln  $hwi$ .

```

% vybrat cas a synchronizovat
t=t1;|
w1=h1;
w2=interp1(t2,h2,t,'linear','extrap');
w3=interp1(t3,h3,t,'linear','extrap');

```

Obr. 21 Synchronizace času v M-souboru

```

% udelat z casu sekundy
ta=t-t(1);
tt=seconds(ta);

```

Obr. 22 Úprava času v M-souboru

```

% vyrobit vlny
hw1=w1-mean(w1);
hw3=w3-mean(w3);
hw2=w2-mean(w2);

```

Obr. 23 Výpočet výšek vln v M-souboru

### ***Odhad spektra směrových vln***

Odhad spektra směrových vln z časových souborů se vyvolá příkazem „*dat2dspec*“ se zadáním jednotlivých proměnných.  $S [S, D, Sw, Fcof] = \text{dat2dspec}(w, pos, h, Nfft, Nt, \text{method}, \text{option})$ . Kde  $S$  je spektrální hustota matice obsahující konstanty:  $S$  2D pole odhadovaného směrového spektra;  $D$  odhad funkce rozložení jako funkce  $\theta$  a  $\omega$ ;  $S(\omega)$  frekvenční spektrum;  $Fcof$  Fourierovy koeficienty funkce šíření  $D(\omega, \theta)$ . Výpočet probíhá ze zadání proměnných na pravé straně. Jednotlivé proměnné jsou  $w$  matice dat sloupců se vzorkovanými časy v prvním sloupci a hodnotami v dalších sloupcích;  $pos$  matice pozic jednotlivých snímacích zařízení s konstantami;  $h$  hloubka vody;  $Nfft$  proměnná pro stejné rozlišení frekvence při porovnání zaměřených signálů s nepatrně odlišnými délkami (vyhlazení křivky);  $Nt$  počet úhlů (výchozí 101); *method MLM* metoda maximální pravděpodobnosti. [9]

```

% pozice čidel
pos=[-1155699.6127 -536183.8833 185.826 1 1;
      -1155700.0600 -536184.2080 185.838 1 1;
      -1155699.5595 -536184.4242 185.828 1 1];
h = 3;
Nfft=256;
Nt=101;
method='MLM';
%options=['ftype', 'f'];

% spektrum
[S, D, Sw, Fcof] = dat2dspec(W,pos,h,Nfft,Nt,method,'ftype','f');

```

Obr. 24 Odhad spektra směrových vln v M-souboru

### Vyhodnocení spektrální charakteristiky a jejich kovariací

Vyhodnocení spektrální charakteristiky a jejich kovariací se vyvolá příkazem „*spec2char*“ se zadáním jednotlivých proměnných  $[ch, R, chtext] = spec2char(S, fakt, T)$ . Kde  $ch$  je vektor spektrálních charakteristik;  $R$  matice odpovídající kovariaci danou  $T$  a  $chtext$  buňka vektorů řetězců popisující prvky  $ch$ . Proměnné na pravé straně jsou:  $S$  struktura směrové spektrální hustoty s úhlovou frekvencí;  $fakt$  vektor faktorů celých čísel. Je to řetězec nebo řádek řetězců;  $T$  doba záznamu. [9]

```
[ch, R, chtext] = spec2char(S,1:1:15);
```

Obr. 25 Příkaz k vyhodnocení spektrální charakteristiky v M-souboru

Důležité rovnice získané ze spektrálních charakteristik:

- Významná výška vlny  $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$
- Perioda energie  $T_{m_{10}} = 2\pi \frac{m_{1_0}}{m_0}$
- Doba špičky  $T_p = \frac{2\pi}{\{\omega | \max(S(\omega))\}}$
- Vrcholová perioda  $T_{p1} = 2\pi \int S(w)^4 dw$

## Vyhodnocení spektrální směrové charakteristiky a jejich kovariací

Vyhodnocení spektrální směrové charakteristiky se vyvolá příkazem „*dspec2char*“ se zadáním jednotlivých proměnných  $[ch, chtext] = dspec2char(S, fakt)$ . Kde  $ch$  je vektor řetězců jednotlivých buněk popisující prvky  $ch$ ;  $chtext$  buňka vektorů řetězců popisující prvky  $ch$ . Proměnné na pravé straně jsou:  $S$  struktura směrové spektrální hustoty s úhlovou frekvencí;  $fakt$  vektor faktorů celých čísel, řetězec nebo řádek řetězců. Je zde zaveden předpoklad, že  $S$  je směrové spektrum  $S(\omega, \theta) = S(\omega) * D(\theta, \omega)$ . Pokud je vstupní spektrum vlnového typu, tak jsou data převedena do směrového spektra před výpočty. [9]

```
[chd, chtextd] = dspec2char(S, 11:1:26);
```

Obr. 26 Příkaz k vyhodnocení spektrální směrové charakteristiky v M-souboru

Důležité faktory získané ze spektrálních směrových charakteristik za pomoci rozšíření Fourierovy řady  $D(\theta, \omega)$ , kde  $n=1$ :

$$D(\theta(i)) = \frac{\{1 + 2 \sum [a_n * \cos(n * \theta(i)) + b_n * \sin(n * \theta(i))]\}}{2\pi}$$

$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad \text{a} \quad c_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}$$

Faktory vypočtené při každé frekvenci (parametry závislé na frekvenci):

- Průměrný směr vln  $F_{Mdir}$
- Hlavní směr vlny  $F_{Pdir}$
- Směrové rozložení  $M_{dir}$   $F_{Spr}$
- Kruhové zakreslení  $M_{dir}$   $F_{Skew}$
- Střední úhel rozložení směru  $F_{MSpr}$
- Distribuční disperzní parametr, S  $F_{SI}$

Faktory vypočtené podle maximální frekvence,  $fp = 1/Tp$ :

- Střední směr vlny na spektrálním vrchol  $T_{pMdir}$

- Směrové rozložení  $T_{pMdir}$   $T_{PSpr}$
- Zkreslení  $T_{pMdir}$   $T_{PSkew}$
- Hlavní směr vln  $W_{dir}$

### ***Výšky a strmosti vln z naměřených a zpracovaných dat***

Extrakce hodnot výšek a strmosti vln z naměřených dat se vyvolá příkazem „*dat2steep*“ se zadáním jednotlivých proměnných  $[S, H] = \text{dat2steep}(x_n, \text{rychlost}, \text{metoda})$ . Kde  $S$  a  $H$  je odpovídající strmost a výška vlny. Proměnné na pravé straně jsou:  $x_n = [t_i; x_1; x_2 \dots x_M]$ , kde  $t_i = \text{čas}$  a  $x_1 x_2 \dots x_M$  jsou  $M$  sloupcové vektory; *rychlost* 1,2,3..., pokud je interpolační rychlost  $< 1$  tak se interpolace neprovádí před extrahováním parametru, pokud je interpolační rychlost  $> 1$  tak se interpolace provádí před extrahováním parametru; *metoda* „1“ metoda funguje na principu periody vrcholového stoupání, rychlost ( $V_{cf}$ ) jako  $S$  a vlnová výška  $H_d$  jako  $H$ . [9]

```
[St, H, Ac, At, Tcf, Tcb, z_ind, yn] = dat2steep(W, 3, 1);
```

Obr. 27 Příkaz k vytažení výšek a strmosti vln v M-souboru

### ***Výpočet charakteristik vln***

Z vypočtených a extrahovaných dat vypočítá počet vln  $N$ . Počet vln je závislý na délce vlny a je extrahován jako minimum  $\omega$  neboli matice dat sloupců se vzorkovanými časy v prvním sloupci a hodnotami výšek v dalších sloupcích. Dále se vypočítá výška vlny s pravděpodobností překročení 1 % a 13 % jako kvantil neboli míra polohy rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny z naměřené výšky. [9]

```
quantile(H, 0.99); %vyska vlny s p. prekroceni 1%
quantile(H, 0.87); %vyska vlny s p. prekroceni 13%
```

Obr. 28 Výpočet charakteristik vln v M-souboru

### ***Export vypočtených dat do souboru \*.xlsx***

Vypočtené výsledky jsou příkazem „*xlswrite*“ exportovány do určeného souboru.

```
xlswrite('2020_09_20_final',ch,'list2');  
xlswrite('2020_09_20_final',chtex,'list3');|  
xlswrite('2020_09_20_final',chd,'list4');  
xlswrite('2020_09_20_final',chtexd,'list5');
```

**Obr. 29** Příklad exportu dat z M-souboru

## 6 MĚŘENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ NA LAGUNĚ HULÍN

### 6.1 LOKALITA

Pro měření vlnových událostí byla zvolena nádrž šterkopískovny Hulín. Pro dlouhodobé zaznamenávání oscilačních vlny je nejvhodnější uzavřená nádrž, kde vznikají vlny pouze působením větru. Tato nádrž se nachází na Moravě, ve Zlínském kraji, v okrese Kroměříž, na okraji města Hulín ve směru na Tlumačov, přibližně 17 km jižně od Přerova a 25 km severozápadně od města Zlín.



Obr. 30 Přehledná mapa zlínského kraje s označením laguny Hulín [24]

Nachází se na katastrálním území města Hulín se zeměpisnými souřadnicemi 49°17'57"N, 17°24'16,618"E.





**Obr. 31 Nádrž Hulín [24]**

Rozloha nádrže činí 93,5 ha.

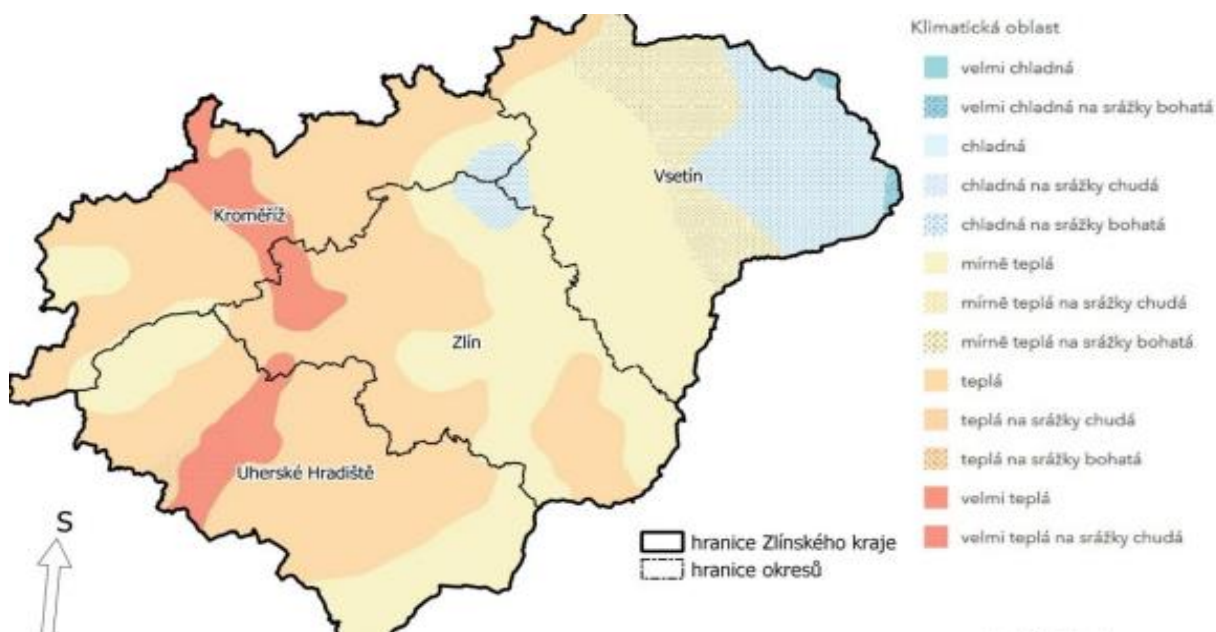
### **6.1.1 KLIMATICKÉ PODKLADY**

Nádrž šterkopískovny se nachází ve Zlínském kraji, území je vertikálně velmi členité, klima se liší v rámci několika kilometrů. V uzavřených údolích a kotlinách se z důvodů špatného provětrávání tvoří teplotní inverze a mlhy. S rostoucí vzdáleností od řeky Moravy se klima ochlazuje. V moravských úvalech je teplá podnební oblast s cca 60 letními dny a 110 mrazovými dny s průměrnou roční teplotou 9 °C a průměrným ročním úhrnem srážek 600 mm. Průměrný počet dnů se sněhovou pokrývkou, která ovlivňuje chování škodlivých látek v ovzduší se pohybuje v rozmezí 60 až 100. [12]

Na rozdíl od ostatních krajů ČR se ve Zlínském kraji vyskytuje poměrně značný počet bouřek a ostatně jako na celé východní Moravě jsou častější srážky s vyšší intenzitou a kratší dobou trvání. [12]

Tab. 1 Tabulka klimatických podmínek oblasti T2 [16]

Počet letních dnů	50 – 60
Počet dní s průměrnou teplotou nad 10°C a více	160 – 170
Počet mrazových dní	100 – 110
Počet ledových dní	30 – 40
Průměrná teplota ledna	- 2 – - 3
Průměrná teplota dubna	8 – 9
Průměrná teplota července	18 – 19
Průměrná teplota října	7 – 9
Průměrný počet dní se srážkami 1 mm a více	90 – 100
Srážkový úhrn za vegetační období	350 – 400
Srážkový úhrn v zimním období	200 – 300
Počet dní se sněhovou pokrývkou	40 – 50
Počet zamračených dní	120 – 140
Počet jasných dní	40 – 50

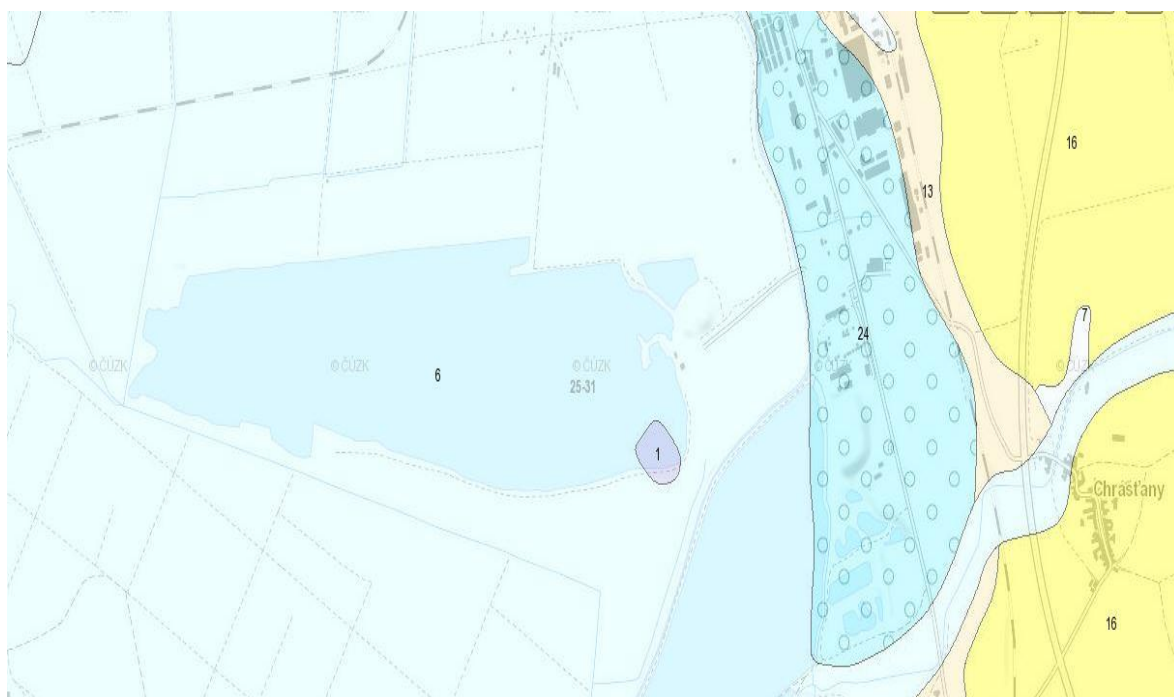


Obr. 32 Mapa podnebí Zlínského kraje [12]

### 6.1.2 GEOMORFOLOGICKÉ PODKLADY

Provincie:	Západní Karpaty
Subprovincie:	Vněkarpatské sníženiny
Oblast:	Západní Vněkarpatské sníženiny
Celek:	Hornomoravský úval
Podcelek:	Středomoravská niva
Okrsek:	Jarohněvická brázda

### 6.1.3 GEOLOGICKÉ PODKLADY



Obr. 33 Podrobná geologická mapa laguny Hulín [13]

Ložisko tvoří fluviální sedimenty Moravy-šterkopísky a přeplavené neogenní písky, které se uložily na podložní tortonské jíly. Hranice mezi šterkopísky a písky je ostrá, v píscích jsou ve větší míře zastoupeny jílové vložky. Z vrtů známe tyto litologicko-stratigrafické profily:

1. nivní hlíny a jíly, holocenního stáří, mocnost 1-4 m (průměr 3 m)
2. fluviální šterkopísky Moravy pliocén kvartér, 4-12 m
3. fluviolakustrinní písky neogénino (terciér) stáří, 20-25 m

#### 4. jily torton terciér

V lokalitě nebylo zjištěno tektonické porušení ani poddolovaná území. [14]

### 6.1.4 HYDROGEOLOGICKÉ PODKLADY

Hodnocené území náleží hydrogeologickému rajónu 16 - Kvartérní sedimenty v povodí řeky Moravy. Hydrogeologický kolektor je složen z průlinově propustných hrubozrnných písků a štěrků nejspíše kvartérního stáří. U písčitých štěrků a písků lze tvrdit, že jsou silně propustné až mírně propustné s hydraulickou vodivostí  $k = 1 \cdot 10^{-5}$  až  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s a průtočností  $T = 1 \cdot 10^{-3}$  až  $9 \cdot 10^{-3}$  m/s. [15]

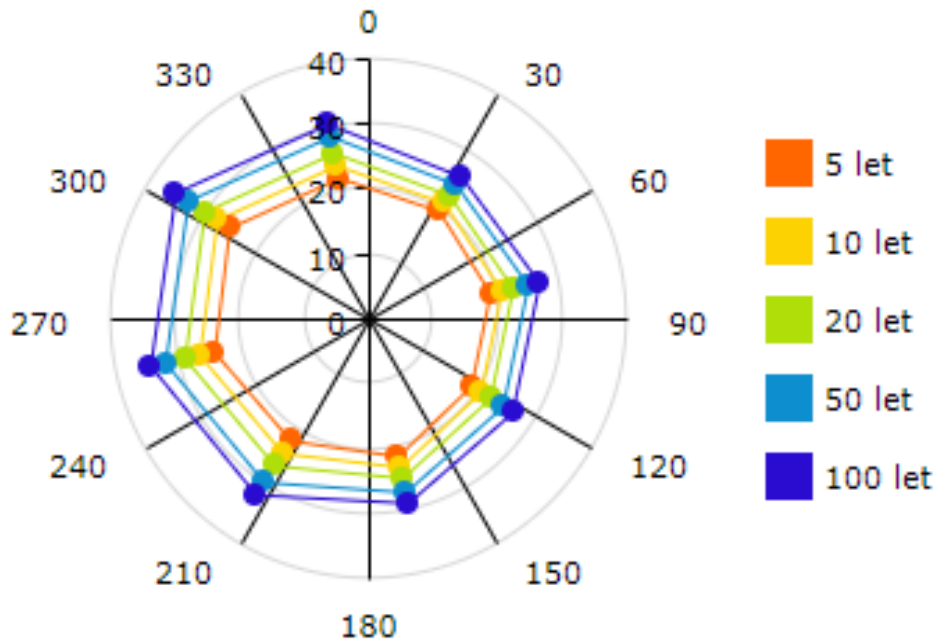
Nádrž štěrkopískovny u Hulína se nachází v proudu podzemní vody protékající jihozápadním směrem od výše položených infiltračních oblastí v liniích Němčice – Rymice a Kurovice – Ludslavice – Třebetice k řece Moravě. Zhruba sledují směr toku Rusavy a na severu území směr toku Moštěnky. Přírodní proud podzemní vody má sklon 0,001 až 0,002 a přibližně západní až jihozápadní směr. [15]

### 6.1.5 VĚTRNOSTNÍ PODMÍNKY

Pro zjištění větrnostních podmínek byla využita interaktivní mapa extrémních nárazů větru ve výšce 10 m nad zemí z ústavu fyziky atmosféry AV ČR v. v. i.

Tab. 2 Tabulka N-letých větrů (m/s) na laguně Hulín [17]

směr / doba opakování	5 let	10 let	20 let	50 let	100 let
11.25° - 56.25°	19.88	21.35	22.81	24.74	26.21
56.25° - 101.25°	19.19	20.99	22.80	25.19	27.00
101.25° - 146.25°	18.89	20.65	22.41	24.73	26.48
146.25° - 191.25°	21.59	23.30	25.00	27.25	28.96
191.25° - 236.25°	22.33	24.63	26.92	29.95	32.25
236.25° - 281.25°	24.54	26.89	29.24	32.34	34.69
281.25° - 326.25°	25.84	28.14	30.45	33.50	35.81
326.25° - 11.25°	22.25	24.22	26.19	28.79	30.76
všechny směry	28.61	30.99	33.30	36.31	38.58



Obr. 34 Směrová růžice N-letých větrů na laguně Hulín [17]

Pro stanovení parametrů je vybrána rychlost  $v_{N100} = 38,58$  m/s (dále jako  $w_{10v}$ ).

## 6.2 MĚŘENÍ VLNOVÝCH UDÁLOSTÍ NA LAGUNĚ HULÍN

Zaměření svahu nádrže, kde bylo zamýšleno osazení konstrukce proběhlo dne 23.11.2018. Měření dna nádrže probíhalo z remorkéru za pomoci GSS stanice a echolotu (obr. 12). Data byla zaznamenávána do počítače. Výsledný soubor dat zaměření jsou prostorové souřadnice x, y a z zapsané do souboru .xlsx. Tyto souřadnice byly importovány do programu CivilCad a byl zpracován do 3D modelu terénu. Následně byla vytvořena situace terénu, dále byly vytvořeny řezy terénem a bylo zvoleno nejvhodnější místo pro osazení systému měření. [20]



Obr. 35 Osazení echolotu na před' remorkéru [20]

Zájmové území k měření bylo vybráno, jako jedno z nejvíce namáhaných bočních břehů oscilačními větrovými vlnami. V současné době probíhá v ložisku těžba a provoz remorkérů na nádrži. Měření tedy bude ovlivněno i vlnami vyvolanými projíždějícími loděmi. Lodě projíždí nádrží cca 32x denně. Místo pro měření bylo zvoleno po dohodě tak, aby nebylo významně ovlivněno provozem lodí na nádrži, a zároveň nebylo v kolizi s plánovaným využitím těžebního ložiska. [20]



**Obr. 36 Umístění systému [20]**

Na jaře roku 2019 byla na nádrži Hulín umístěna pracovní plošina s obslužnou a nosnou funkcí pro automatizovanou stanici. V hloubce vody 3 m.



**Obr. 37 Pracovní plošina-realizace [19]**

Běžná obsluha zařízení a přesun materiálu a komponent je realizován pomocí člunu.



Obr. 38 Obsluha zařízení [19]





Obr. 39 Fixace čidel pod vodní hladinou [19]

## 6.2.1 PŘEHLED KOMPONENT SYSTÉMU

### *Sběr a základní zpracování dat*

Raspberry Pi2 – centrální jednotka

Arduino UNO – jednotka sběru dat: výšková úroveň vodní hladiny v nádrži

Ultrazvukový senzor – pracuje na kombinovaném principu mechanicko-ultrazvukovém. Jedná se o trojici ultrazvukových čidel, kontinuálně snímajících vzdálenost příslušných plováků, pohybujících se pouze ve vertikálním směru díky napnutým vodícím lankům. Systém čidel je fixován pouze na jednom tyčovém prvku, proto se celkově zjednodušilo i uchycení na samotnou pracovní plošinu.

Anemometr – jednotka sběru dat: směr a rychlost větru

WindETH – komunikační prvek pro sběr dat z anemometru

USB kamera – vizuální kontrola systému

### ***Přenos dat***

Modem USB – komunikační prvek pro odesílání dat

Anténa pro GSM – komunikační prvek pro odesílání dat

### ***Systém napájení***

Solární panel BlueSolar 80Wp

Solární baterie Banner 80Ah

Regulátor napájení BlueSolar MPPT 75/15 – kontrola energie a převodu mezi jednotlivé prvky (sběrnice dat pro solární kontroler)

Převodník napětí 12/5 V – napájení centrální jednotky Raspberry Pi2



**Obr. 40** Odporová čidla [19]



**Obr. 41 Anemometr-snímač rychlosti a směru větru WindETH [19]**

Více o měřicí technice na laguně Hulín viz kap. 4.2.

### 6.3 VLNOVÉ UDÁLOSTI NA LAGUNĚ HULÍN

Na nádrži v Hulíně byla dlouhodobě zaznamenávána data pomocí měřicí techniky (viz kap. 4.2.) o pohybu hladiny v čase a působení větru v čase. V rámci této práce bylo zpracováno 22 několika hodinových vlnových událostí od května 2020 do října 2020.

U každé vlnové události jsou zaznamenána data na 3 čidlech a anemometru. Pro dosažení výsledků je použito programu MATLAB s WAFO toolboxem. Data jsou do programu importována, následně upravována na požadovaný tvar a exportována do souboru .xlsx (viz kap. 5.3).

Výstup z programu je zapsán do tabulkového souboru s jednotlivými výsledky a dále jsou vytvořeny grafy, a to směrového spektra vln po kruhové orbitě, spektrální hustoty, průběhu vln a histogram hustoty rozdělení výšky vlny.

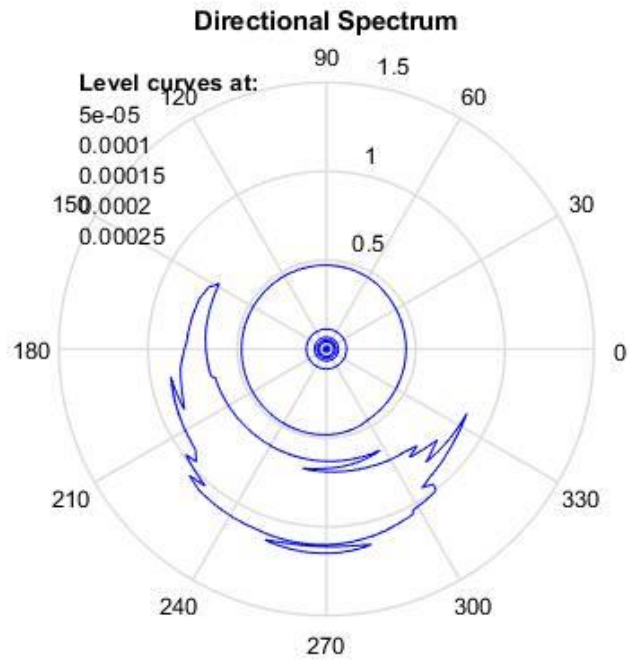
Prezentovaná data jsou reálné výsledky z měření dne 3.10.2020. Jde o reprezentativní ukázkou výsledků.

**Tab. 3 Parametry vlny z měření ze dne 3.10.2020**

$H_{1P}$	0.23	m	Výška vlny s pravd. překročení 1 %
$H_{13P}$	0.08	m	Výška vlny s pravd. překročení 13 %
$H_{m0}$	0.11	m	Charakteristická výška vlny
$T_{m\_10}$	4.42	s	Perioda energie
$T_p$	49.66	s	Doba špičky
$T_{p1}$	19.57	s	Vrcholová perioda
$T_{m01}$	1.06	s	Střední perioda vlny
$T_{m02}$	0.83	s	Střední perioda procházející nulou

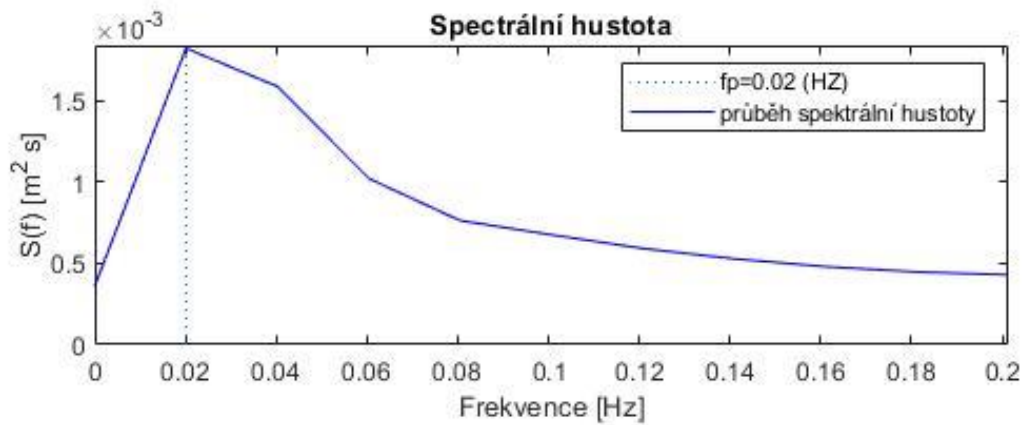
#### 6.3.1 SMĚROVÉ SPEKTRUM PO KRUHOVÉ ORBITĚ

Graf směrového spektra energie vln zobrazuje převládající směr vln.



Obr. 42 Směrové spektrum energie vln 3.10.2020

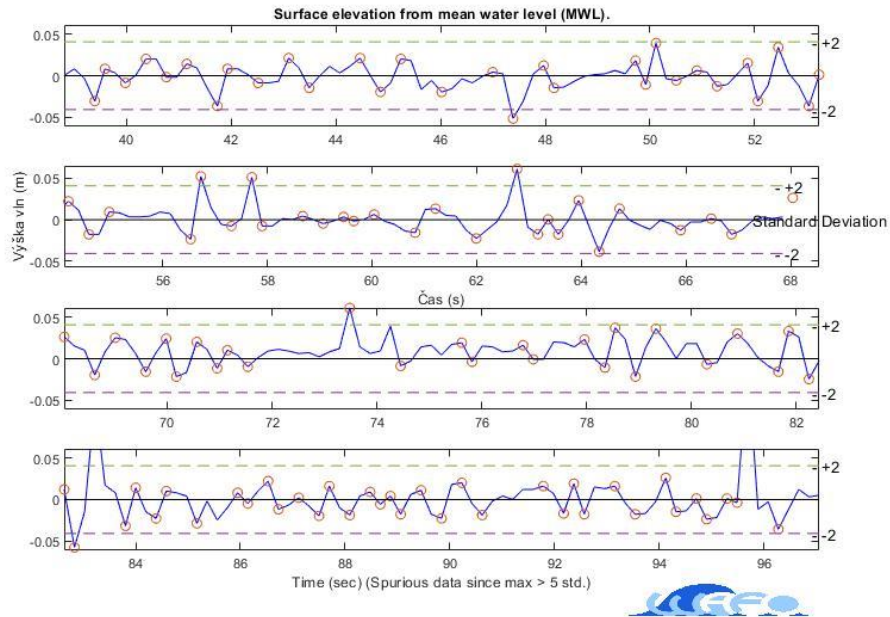
### 6.3.2 SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA



Obr. 43 Spektrální hustota

Spektrální hustota je řez směrovým spektrem energie, ve kterém je zobrazena vrcholová spektrální hustota.

### 6.3.3 PRŮBĚH VLN V ČASOVÉM INTERVALU

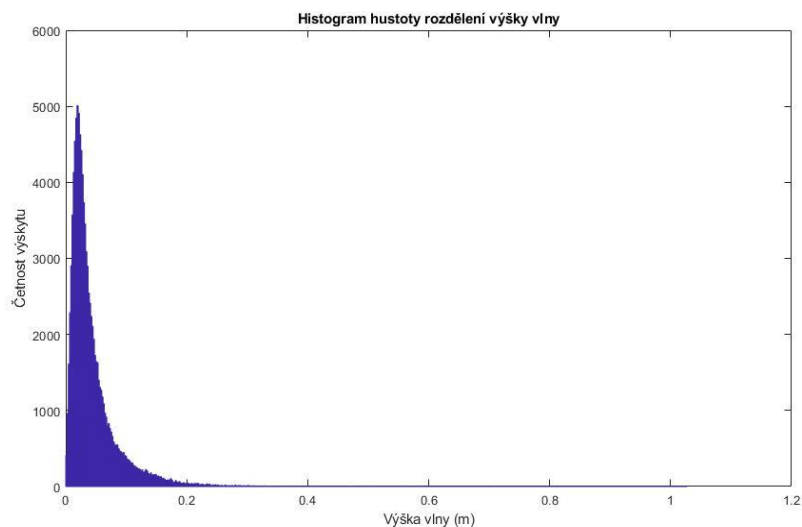


Obr. 44 Průběh vln v časovém intervalu

Graf průběhu vln v zobrazuje rozdíl výšek od střední hladiny časovém intervalu.

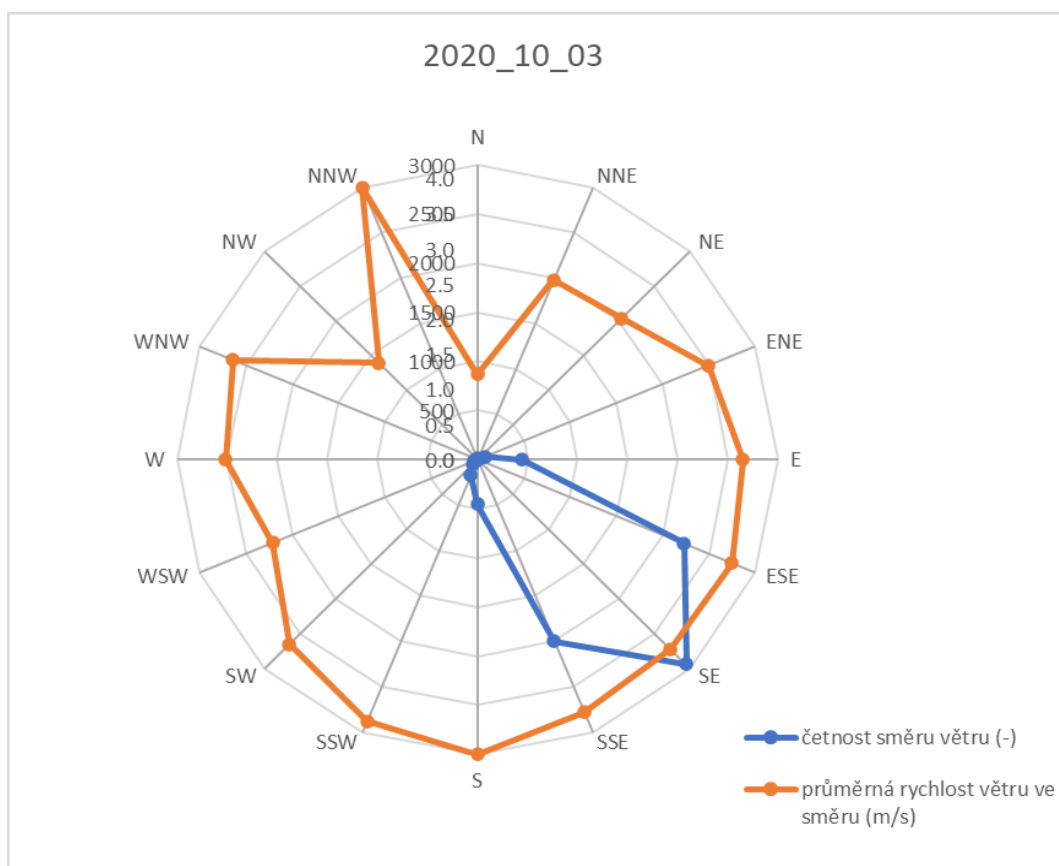
### 6.3.4 HISTOGRAM HUSTOTY ROZDĚLENÍ VÝŠKY VLN

Histogram hustoty rozdělení výšky vlny je zobrazením četnosti vlny o určité výšce.



Obr. 45 Histogram hustoty rozdělení výšky vlny

### 6.3.5 VYHODNOCENÍ ANEMOMETRU



Obr. 46 Vyhodnocení anemometru

V grafu anemometru jsou zobrazeny směry větru společně s jejich průměrnou rychlostí. Lze tedy tvrdit, že dne 3.10.2020 působil na nádrži jihovýchodní vítr o průměrné rychlosti 3,8 m/s.

## 6.4 ČSN 75 0255

Pro ověření správnosti výsledků naměřených dat ze dne 3.10.2020 byly základní parametry vlny ověřeny výpočtem podle ČSN 75 0255: *Výpočet účinků vln na stavby na vodních nádržích a zdržích.*

### 6.4.1 CHARAKTERISTICKÁ VÝŠKA VLNY A JEJÍ PERIODA



Obr. 47 Rozběh vlny pro zvolený svah [2]

Tab. 4 Výpočet efektivní délky [2]

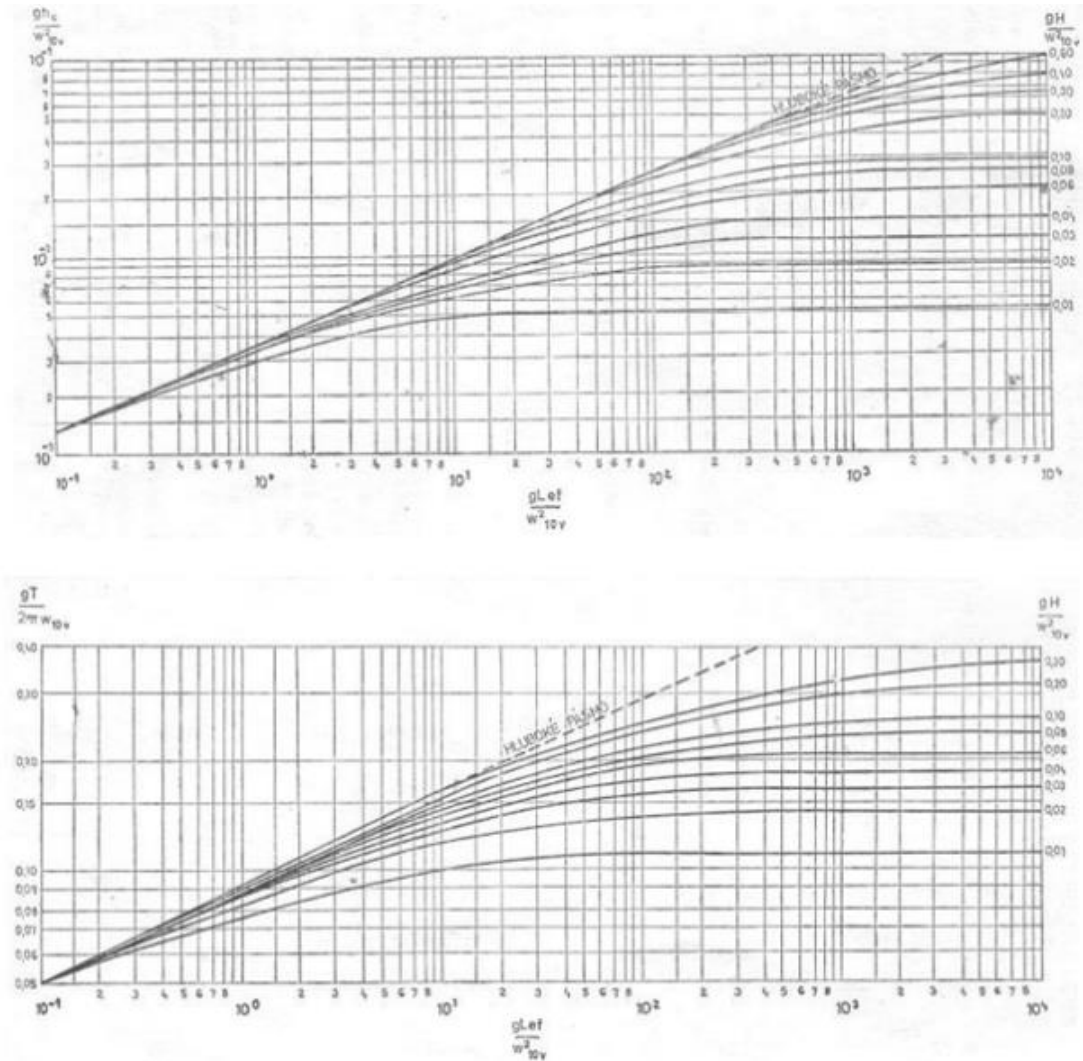
Radiála	$L_i$	$\phi_i$	úhel rad	$L_i \cdot \cos^2 \phi$	$\cos \phi$	$L_{ef}$
1	650	42	0.73	358.97	0.74	630.05
2	446	36	0.63	291.91	0.81	
3	453	30	0.52	339.75	0.87	
4	463	24	0.42	386.40	0.91	
5	480	18	0.31	434.16	0.95	
6	506	12	0.21	484.13	0.98	
7	842	6	0.10	832.80	0.99	
8	721	0	0.00	721.00	1.00	
9	640	6	0.10	633.01	0.99	
10	582	12	0.21	556.84	0.98	
11	537	18	0.31	485.72	0.95	
12	1011	24	0.42	843.75	0.91	
13	1184	30	0.52	888.00	0.87	
14	1369	36	0.63	896.02	0.81	
15	652	42	0.73	360.08	0.74	
				8512.54	13.51	

Obr. 48 Graf pro výpočet charakteristické výšky vlny a její periody [2]



**Tab. 5 Hodnoty pro výpočet charakteristické výšky vlny a její periody**

$g$	9.81	$m/s^2$
$H$	3	$m$
$w_{10v}$	38.58	$m/s$
$L_{ef}$	630.05	$m$

**Obr. 49 Grafy pro výpočet charakteristické výšky vlny a její periody**

$$\frac{gH}{w_{10v}^2} = 0,02$$

$$\frac{gL_{ef}}{w_{10v}^2} = 4,15$$

$$\frac{gh_c}{w_{10v}^2} = 0,001$$

$$h_c = 0,15 \text{ m}$$

Charakteristická výška vlny

$$\frac{gT}{2\pi w_{10v}} = 0,121$$

$$T = 24,7 \text{ s}$$

Perioda charakteristické výšky vlny

#### 6.4.2 VÝŠKA VLNY S PRAVDĚPODOBNOSTÍ PŘEKROČENÍ 1 % A 13 %

Tab. 6 Součinitel  $k_p$  pro výpočet pravděpodobnosti překročení výšky vlny

Pravděpodobnostní překročení [%]	1	2	5	10	13
Součinitel $k_p$	1,40	1,28	1,17	1,05	1,00

$$h_{1\%} = h_c * k_p = 0,21 \text{ m}$$

výška vlny s pravděpodobností překročení 1 %

$$h_{13\%} = h_c * k_p = 0,15 \text{ m}$$

výška vlny s pravděpodobností překročení 13 %

#### 6.5 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Výsledky výpočtů z měření vlnové události dne 3.10.2020 jsou odpovídající ve srovnání s výsledky výpočtu podle normy ČSN 75 0255: *Výpočet účinků vln na stavby na vodních nádržích a zdržích*. Při srovnání si navzájem úplně neodpovídají. To je způsobeno délkou naměřených dat a jejich zprůměrováním a také ovlivnění vln od lodí.

Tab. 7 Porovnání výsledků z měření a výsledků podle normy ČSN 75 0255

Výsledky z měření		Výsledky dle ČSN 75 0255	
$H_{m0}$ [m]	0.11	$h_c$ [m]	0.15
$T_p$ [s]	19.57	$T$ [s]	24.70
$H_{1P}$ [m]	0.23	$h_{1\%}$ [m]	0.21
$H_{13P}$ [m]	0.08	$h_{13\%}$ [m]	0.15

Charakteristická výška vlny

Perioda charakteristické výšky vlny

Výška vlny s pravd. překročení 1 %

Výška vlny s pravd. překročení 13 %

Z výsledků z porovnání výpočtů v programu MATLAB a podle normy ČSN 75 0255 vyplývá, že tato metoda řešení problematiky je vhodná k dosažení požadovaných výsledků.

Díky množství dat, která jsou na čidlech naměřena několikrát za sekundu, jsou výsledky z měření a zpracování v MATLABu přesnější.

## 7 ZÁVĚR

Cílem této závěrečné práce bylo zpracování dat o měření na nádrži Hulín a jejich zhodnocení. Vlny vyvolané působením větru či vodní dopravou zatěžují vodní stavby a svahy vodních nádrží. Proto je v posledních letech stále více kladen důraz na individualizaci návrhů spojenou s efektivním využitím finančních prostředků na investice do ochranných opatření. Vznikem a odhadem parametrů větrových vln, tedy jejich výpočty se zabývá norma ČSN 75 0255 *Výpočet účinku vln na stavby na vodních nádržích a zdržích* z roku 1987, která se ale opírá o výsledky výzkumů prováděných především u mořských pobřeží.

Byly sledovány základní parametry jako výška vlny, její perioda a tvar spektra. Data byla měřena v zájmové území k měření, které bylo vybráno, jako jedno z nejvíce namáhaných bočních břehů oscilačními větrovými vlnami. Měření bylo ovlivňováno i vlnami vyvolanými projíždějícími loděmi, které projíždí nádrží cca 32x denně a probíhající těžbou. V zájmovém území v místě s hloubkou vody 3 m, byla v roce 2019 postavena pracovní plošina s obslužnou a nosnou funkcí pro měřicí techniku pro měření vlnových událostí (viz. kap. 4.2). Data byla získávána ze 3 čidel, která snímala pohyb hladiny a anemometru, který snímal směr a rychlost větru.

V období probíhajícího dlouhodobého měření od května 2020 až do října 2020, bylo vybráno 22 vlnových událostí. Prvně byly vyhledány dny s vlnovými událostmi, poté se data ke zpracování zkrátila pouze na vlnovou událost a následně byla importována do prostředí MATLAB. Získaná data každé vlnové události obsahovala textový soubor s naměřenými výškami hladiny v čase pro každé čidlo a záznam z anemometru v textovém souboru udávající směr a rychlost větru po dobu vlnové události. Tato data byla zpracována pomocí programu MATLAB s WAFO toolboxem. Postup výpočtu byl následující, data byla importována, naměřené výšky v čase byly převedeny na výšky hladiny v čase pro každé čidlo. Časy měření na čidlech se pomocí lineární interpolace převedly na jeden absolutní čas, který byl následně převeden na sekundy. Z výšek hladin byly vypočteny střední hodnoty výšek hladin, ze kterých byla následně s časem vytvořena matice pro výpočet spektra. Pomocí příkazů v MATLABu byly vypočteny základní parametry vlny (viz kap. 5.3) jako charakteristická výška vlny a její perioda, výška vlny s pravděpodobností překročení 1 % a výška vlny s pravděpodobností překročení 13 %. Byly také vytvořeny grafy, a to graf směrového spektra, který zobrazuje převládající směr vln vlnové události. Řez směrovým spektrem jako graf spektrální hustoty. Průběh vln v časovém intervalu, kde je zobrazen rozdíl výšek od střední hladiny v časovém intervalu. Histogram četnosti vlny o určité výšce jako histogram hustoty rozdělení výšky vlny. Data z anemometru byla zpracována v aplikaci Excel, kde byly vytvořeny také grafy zobrazující četnost směru větru v období vlnové události a její průměrnou rychlost.

V této práci jsou demonstrovány výsledky z vlnové události dne 3.10.2020. Pro ověření správnosti výsledků naměřených dat ze dne 3.10.2020 byly základní parametry vlny ověřeny

výpočtem podle ČSN 75 0255: *Výpočet účinků vln na stavby na vodních nádržích a zdržích*. Výsledky výpočtu vlnové události z měření na nádrži jsou odpovídající ve srovnání s výsledky výpočtu podle normy podle ČSN 75 0255. Odchytky ve výsledcích jsou způsobeny délkou vlnové události a počtem dat a taky ovlivněním vlnami od projíždějících lodí. Z výsledků z porovnání výpočtů v programu MATLAB a podle normy ČSN 75 0255 vyplývá, že tato metoda řešení problematiky je vhodná k dosažení požadovaných výsledků.

Zpracováním vlnových událostí vznikl vlnový atlas, s jehož využitím lze navrhnout efektivní ochranu břehů proti rozmývání vlnami.

## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MAHMOOD, Mohamad F. (Editor); HENDERSON, Diane (Editor); SEGUR, Harvey (Editor). *Water Waves Theory and Experiment: Proceedings of the Conference*. River Edge, NJ, USA: World Scientific Publishing Co., 2010. Str. 79–81.
- [2] ČSN 75 0255: *Výpočet účinků vln na stavby na vodních nádržích a zdržích*. 23.2.1987. Praha 10, Hostivař: ÚNM, 1987.
- [3] ČSN 73 6500: *Výpočet účinku vln*. 28.4.1971. Praha 10, Hostivař: ÚNM, 1972.
- [4] ŠOFER, Michal. *Digitální zpracování signálů – Fourierova transformace, FFT Frekvenční analýza [přednáška]*. Ostrava: Strojní fakulta VŠB TU. Dostupné z: [https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/EXPME\\_3.pdf](https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/EXPME_3.pdf)
- [5] BOOR, B.- KUNŠTACKY, J.- PATOČKA, C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL, 1968.
- [6] *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele: Fyzikální vlastnosti mořské vody*. *Is.muni.cz* [online]. 2014, 2014 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz\\_geogr/web/pages/12-2-fyzikalni-vlastnosti.html](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/12-2-fyzikalni-vlastnosti.html)
- [7] ŠLEZINGR, Miloslav. *Břehová abraze: Možnosti stabilizace břehů*. 2011. Brno: FOLIA, 2011. ISBN 978-80-7375-566-9.
- [8] *Kmity a vlnění*. *Kfy.zcu.cz* [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: [https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/TFYEKS/TFY\\_b\\_v6.pdf](https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/TFYEKS/TFY_b_v6.pdf)
- [9] – a *Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads: Tutorial for WAFO version 2017*. *Maths.lth.se* [online]. Lund University, 2017, září 2017 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: [http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/Wafo\\_tutorial\\_2017](http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/Wafo_tutorial_2017)
- [10] GUARAGLIA, Dardo Oscar, Jorge Lorenzo POUSA, Alessandro PEZZOLI a Robert G. WATTS. *Introduction to Modern Instrumentation for Hydraulics and Environmental Sciences* [online]. 1. Deutsche: Deutsche Nationalbibliothek The Deutsche Nationalbibliothek list, 2014. ISBN 978-3-11040172-1. Dostupné z: <http://dnb.dnb.de>.
- [11] VOJÁČEK, Antonín. *Automatizace.hw.cz: integrované AMR senzory magnetického pole*. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2011, 12.5.2011 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-amr-senzory-magnetickeho-pole>

- [12] *Eazk.cz* [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: [http://www.eazk.cz/ksei/pdf/ksei\\_pse\\_kap02.pdf](http://www.eazk.cz/ksei/pdf/ksei_pse_kap02.pdf) [13] Geologickémapy.cz
- [14] GODANY, Josef. PASPORTIZACE LOMŮ PŘÍRODNÍHO KAMENIVA ČR. *Pjpk.cz* [online]. Praha, 2015, 25.9.2015 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_4\\_6\\_5\\_KAMENIVO/kamenivo.pdf.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_4_6_5_KAMENIVO/kamenivo.pdf.pdf)
- [15] ŘÍHA, Jaromír. Modelové řešení rozsahu ochranného pásma 2. stupně jímacího území u Hulína. Brno, 2001.
- [16] QUITT, E., Mapa klimatických oblastí ČSSR, 1:500 000. Kartografické nakladatelství Praha pro Geografický ústav ČSAV Brno, 1970.
- [17] Mapa extrémních nárazů větru ve výšce 10 m nad povrchem. <Http://vitr.ufa.cas.cz/> [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/extremni-vitr/>
- [18] *Ochrana konstrukcí vodních staveb a přirozených břehů před účinky oscilačních větrových vln: Systém sběru a přenosu dat oscilačních větrových vln*. Brno, 2018. Dílčí zpráva I. Vysoké učení technické v Brně, FAST, Ústav vodních staveb (VUT). Vedoucí práce Ing. Miroslav Špano, Ph.D.
- [19] *Ochrana konstrukcí vodních staveb a přirozených břehů před účinky oscilačních větrových vln: Vývoj systému sběru a přenosu dat oscilačních větrových vln*. Brno, 2018. Dílčí zpráva III. Vysoké učení technické v Brně, FAST, Ústav vodních staveb (VUT). Vedoucí práce Ing. Miroslav Špano, Ph.D.
- [20] *Ochrana konstrukcí vodních staveb a přirozených břehů před účinky oscilačních větrových vln: Dlouhodobé měření na nádrži Hulín – Základní rešerše území s návrhem místa a konstrukce pro měřicí systém*. Brno, 2018. Dílčí zpráva II. Vysoké učení technické v Brně, FAST, Ústav vodních staveb (VUT). Vedoucí práce Ing. Miroslav Špano, Ph.D.
- [21] What Is MATLAB? *Uk.mathworks.com* [online]. United Kingdom [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [22] What Is WAFO. *Maths.lth.se* [online]. Lund University, 2017, 31.10.2017 [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/about.html>
- [23] MATLAB: Programming Fundamentals [online]. March 2017. The MathWorks, Inc. 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098: MATLAB and Simulink are registered trademarks of The Math Works, 2017. [cit. 2021-01-14].

[24] Google Mapy. *Www.google.com* [online]. [cit. 2021-01-14]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps/@49.301799,17.4486041,3784m/data=!3m1!1e3>



## 9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Tabulka klimatických podmínek oblasti T2 [16] .....	42
Tab. 2 Tabulka N-letých větrů (m/s) na laguně Hulín [17] .....	44
Tab. 3 Parametry vlny z měření ze dne 3.10.2020 .....	52
Tab. 4 Výpočet efektivní délky [2].....	56
Tab. 5 Hodnoty pro výpočet charakteristické výšky vlny a její periody .....	57
Tab. 6 Součinitel $k_p$ pro výpočet pravděpodobnosti překročení výšky vlny .....	58
Tab. 7 Porovnání výsledků z měření a výsledků podle normy ČSN 750 255 .....	58

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Základní parametry vlny [6].....	7
Obr. 2 Perioda vlny [8].....	11
Obr. 3 Plovoucí bóje [10].....	15
Obr. 4 Těžká bóje [10].....	16
Obr. 5 Akustický senzor na měření vln [10].....	17
Obr. 6 princip měření optickým zařízením.....	18
Obr. 7 Odporový snímač [10].....	21
Obr. 8 AMR element [11].....	22
Obr. 9 Závislost odporu na intenzitě magnetického pole permalloy proužku [11].....	22
Obr. 10 Blokové schéma systému sběru a přenosu dat.....	23
Obr. 11 Centrální jednotka Raspberry Pi2 [19].....	24
Obr. 12 Řídící jednotka sběru dat kolísání vodní hladiny Arduino UNO Rev3 [19].....	25
Obr. 13 Detail části odporového čidla.....	26
Obr. 14 Čidla pro snímání pohybu hladiny [18].....	27
Obr. 15 Schéma principu snímání hladiny [20].....	28
Obr. 16 Anemometr WindETH [19].....	29
Obr. 17 Solární panel BlueSolar 80Wp [19].....	31
Obr. 18 Uložení řídicích jednotek systému v plastovém boxu [21].....	31
Obr. 19 Prostředí MATLABu.....	33
Obr. 20 Přepočítání výšek v M-souboru.....	34
Obr. 21 Synchronizace času v M-souboru.....	35
Obr. 22 Úprava času v M-souboru.....	35
Obr. 23 Výpočet výšek vln v M-souboru.....	35
Obr. 24 Odhad spektra směrových vln v M-souboru.....	36
Obr. 25 Příkaz k vyhodnocení spektrální charakteristiky v M-souboru.....	36
Obr. 26 Příkaz k vyhodnocení spektrální směrové charakteristiky v M-souboru.....	37
Obr. 27 Příkaz k vytažení výšek a strmosti vln v M-souboru.....	38
Obr. 28 Výpočet charakteristik vln v M-souboru.....	38
Obr. 29 Příklad exportu dat z M-souboru.....	39
Obr. 30 Přehledná mapa zlínského kraje s označením laguny Hulín [24].....	40
Obr. 31 Nádrž Hulín [24].....	41
Obr. 32 Mapa podnebí Zlínského kraje [12].....	42
Obr. 33 Podrobná geologická mapa laguny Hulín [13].....	43

Obr. 34 Směrová růžice N-letých větrů na laguně Hulín [17].....	45
Obr. 35 Osazení echolotu na příď remorkéru [20] .....	46
Obr. 36 Umístění systému [20] .....	47
Obr. 37 Pracovní plošina-realizace [19] .....	47
Obr. 38 Obsluha zařízení [19] .....	48
Obr. 39 Fixace čidel pod vodní hladinou [19].....	49
Obr. 40 Odporová čidla [19].....	50
Obr. 41 Anemometr-snímač rychlosti a směru větru WindETH [19] .....	51
Obr. 42 Směrové spektrum energie vln 3.10.2020 .....	53
Obr. 43 Spektrální hustota .....	53
Obr. 44 Průběh vln v časovém intervalu .....	54
Obr. 45 Histogram hustoty rozdělení výšky vlny.....	54
Obr. 46 Vyhodnocení anemometru .....	55
Obr. 47 Rozběh vlny pro zvolený svah [2].....	56
Obr. 48 Graf pro výpočet charakteristické výšky vlny a její periody [2].....	56
Obr. 49 Grafy pro výpočet charakteristické výšky vlny a její periody.....	57

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### ZKRATKY

WAM	WAve Model
ADCP	Akustický Dopplerův proudový profil
AMR	Anizotropní magnetorezistence
ČSN	Československá státní norma
DIA	Discrete Interaction Approximation
MATLAB	Matrix Laboratory- MATicová LABoratoř
SWAMP	Surface Water Ambient Monitoring Program
VUT	Vysoké Učení Technické v Brně
WAFO	Wave Analysis for Fatigue and Oceanography -Vlnová Analýza pro Únavu a Oceánografii
chtext	buňka vektorů řetězců popisující prvky ch
dat2dspe	c odhad spektra směrových vln z časových souborů
dat2spec	odhad jednostranné spektrální hustoty z dat
dat2steep	extrakce hodnot výšek a strmosti vln z naměřených dat
fakt	vektor faktorů celých čísel, řetězec nebo řádek řetězců

### SYMBOLY

$a_i$	Fourierův koeficient	[-]
$b_i$	Fourierův koeficient	[-]
$c$	vrchol vlny	[-]
$c$	konstanta	[-]
$\cos \theta_i$	posloupnost fazi	[-]
$D$	odhad funkce rozložení jako funkce $\theta$ a $w$	[-]
$f$	zakladni frekvence	[Hz]
$F_{\text{cof}}$	Fourierovy koeficienty funkce šíření $D(W, \theta)$	[-]
$F_{\text{Mdir}}$	Průměrný směr vln	[°]
$F_{\text{Pdir}}$	Hlavní směr vln	[°]
$F_{\text{Spr}}$	Směrove rozloženi $M_{\text{dir}}$	[-]
$F_{\text{Skew}}$	Kruhove zkrasleni $M_{\text{dir}}$	[-]

$F_{MSpr}$	Střední uhel rozložení směru	[°]
$F_{S1}$	Distribuční disperzní parametr S	[-]
$\omega$	kruhová frekvence	[Hz]
$g$	gravitační konstanta	[m/s <sup>2</sup> ]
$g$	transformace za předpokladu, že x je vzorek transformovaný Gaussův proces.	[-]
$h_i$	hloubky vody	[m n. m.]
$h$	ponořena hloubka senzoru	[m]
$H$	výška hladiny vody	[m]
$h_c$	charakteristická výška vlny	[m]
$H_{m0}$	charakteristická výška vlny	[m]
$h_{wi}$	výšky vln	[m]
$H_{1p}$	výška překročení vlny s pravděpodobností 1 %	[m]
$H_{13p}$	výška překročení vlny s pravděpodobností 13 %	[m]
$ch$	vektor spektrálních charakteristik	[-]
$I$	elektrický proud	[A]
$ImLM$	iterativní metoda maximální pravděpodobnosti	[-]
$K$	konstanta zahrnující průměr drátu, elektrický izolátor a permitivita dielektrik	[F/m]
$L$	délka ponoření tyči	[m]
$L_{ef}$	efektivní délka rozběhu větru	[m]
$M$	magnetické pole	[-]
$M$	střední hodnoty, průměr všech hodnot	[-]
$m_n$	spektrální moment	[...]
$m_w$	délka vlny minima	[m]
$M_w$	délka vlny lokálního maxima	[m]
$N_t$	počet uhlů	[ks]
$N_{fft}$	proměnná pro stejné rozlišení frekvence při porovnání zaměřených signálů s nepatrně odlišnými délkami	[-]
$p$	míra spolehlivosti	[%]
$pos$	matice pozic jednotliv. snímacích zařízení s konstantami	[-]
$r$	poloměr kružnice	[m]
$R$	matice odpovídající kovarianci danou T	[-]
$R$	odpor	[Ω]
$R_i$	nezávislý náhodný faktor s distribucí Rayleigh	[-]
$S$	Strmost vlny	[-]

S 2D	pole odhadovaného směrového spektra	[-]
S	Struktura směrové spektrální hustoty s uhlovou frekvencí	[-]
S ( $\omega$ )	frekvenční spektrum	[m <sup>2</sup> .s/rad]
S ( $\omega_i$ )	spektrum výkonu $x(t)$ zapsané jako dvousloupcová matice	
$\sin \theta_i$	Posloupnost fází	[-]
S	Výkonné spektrum	[m <sup>2</sup> .s/rad]
$t_i$	naměřené časy	
tt	čas	[s]
t	úžlabí vlny	[-]
T	perioda vlny	[s]
$T_p$	vrcholová perioda	[s]
$T_{p1}$	vrcholová perioda (robustní odhad)	[s]
$T_{pMdir}$	Střední směr vlny na spektrálním vrcholu	[-]
$T_{pSpr}$	Směrové rozložení $T_{pMdir}$	[-]
$T_{pSkew}$	Zkreslení $T_{pMdir}$	[-]
$W_{dir}$	Hlavní směr vln	[°]
$T_{MM}$	Vrcholová perioda	[s]
$T_{mm}$	Úžlabní perioda	[s]
$t_{min}$	minimální trvání větru	[min]
$T_{m01}$	střední perioda vlny	[s]
$T_{m02}$	střední perioda vlny procházející nulou	[s]
$T_{M\_10}$	perioda energie	[s]
u	střednice vlny	[-]
v	rychlost	[m/s]
$w_i$	naměřené výšky vln	[cm]
W	matice spektra	[-]
$w_{10z}$	rychlost větru ve výšce 10 m nad zemi	[m/s]

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

CD:

- Data zaznamenaná měřicí technikou v souboru s příponou .txt
- Data v časovém úseku vlnových událostí v souboru s příponou .xlsx
- Výsledky z měření vlnových událostí v souboru s příponou .xlsx
- Výsledky z měření anemometru v období vlnové události s příponou .xlsx
- M-soubory vlnových událostí