

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
**FAKULTA ELEKTRONIKY A INFORMATIKY**

**Analýza anemometrických záznamů a vliv větrných  
turbulencí na fluktuaci radiokomunikačního signálu**

**Autor práce: Jan Jaroš**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2009**

**UNIVERSITY OF PARDUBICE  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING  
AND INFORMATICS**

**Analysis anemometric records and the influence  
air-turbulence fluctuation on the radiocommunication signals.**

**Author: Jan Jaroš**

**Supervisor: doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.**

**BACHELOR WORK**

**2009**

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky  
Akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan JAROŠ**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
  
Název tématu: **Analýza anemometrických záznamů a vliv větrných turbulencí na fluktuaci radiokomunikačního signálu**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Přehled měření rychlosti větru a jeho význam pro šíření vln. Popis dostupných anemometrických dat z pracoviště AVČR na Milešově. Základní statistický popis dat (včetně výpočtu turbulencí) s ohledem na vliv šířícího se optického signálu. Závěr a případné ověření experimentem (optický směrový spoj na Milešově).

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Wilfert, O., Kolka, Z., Biolkova, V., Křivák, P., Dordová, L., Fišer, O., Němeček, J. Dual optical wireless test link. Proceedings of the SPIE, Volume 7091 (Free-Space Laser Communications VIII), pp. 70910W-70910W-8 (2008). Dokumenty ITU-R

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.  
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání bakalářské práce: 15. ledna 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. května 2009



doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

**Prohlašuji:**

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Kolíně 15.5.2009

Jan Jaroš

## **Poděkování:**

V první řadě bych touto cestou chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc., za to, že si na mě udělal čas ve svém, už tak velmi nabitém programu a pomohl tuto práci uskutečnit. Jeho rady, poznatky a poskytnuté materiály byly pro mne velmi přínosné. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Jaroslavu Svobodovi, Csc., za jeho zpřesňující rady a poznatky, vytvoření programů, které mi usnadnily práci. Nesmím zapomenout na svého přítele Vladimíra Brázdu, se kterým jsem spolupracoval.

**Anotace:**

V této práci se zabývám zmapováním chování větru a především větrných turbulencí.

Hlavním úkolem bylo zmapovat chování optického bezdrátového spoje, ovlivněného atmosférickými poruchami, a to především větrných turbulencí a s nimi spojenými výkyvy.

**Klíčová slova:**

optický bezdrátový spoj, intenzita turbulence, rychlost větru, sonická teplota, směrodatná odchylka, útlum, dohlednost

**Abstract:**

In this work we deal with the behavior of mappings of wind turbulence and wind in particular.

The main task was to map the behavior of optical wireless connections, affected by atmospheric conditions, especially wind turbulence and associated fluctuations.

**Keywords:**

Free space optics, intensity turbulence, wind speed, sonicka temperature, standard deviation, attenuation, visibility

## Obsah:

1.	Úvod.....	- 11 -
2.	Optický bezdrátový spoj .....	- 12 -
2.1.	Výhody OBS:.....	- 12 -
2.2.	Nevýhody OBS: .....	- 12 -
3.	Účinky atmosféry:.....	- 13 -
4.	Výkonové úrovně OBS .....	- 14 -
4.1.	Stacionární model spoje:.....	- 14 -
4.2.	Statický model .....	- 16 -
4.3.	Vliv větrných turbulencí na OBS.....	- 17 -
5.	Observatoř Milešovka .....	- 19 -
5.1.	Optický spoj: .....	- 20 -
5.1.1.	Vysílač: .....	- 20 -
5.1.2.	Přijímač .....	- 20 -
5.2.	Anemometry .....	- 22 -
5.3.	Dohledoměr Vaisala PWD21 .....	- 23 -
6.	Teorie větru a větrných turbulencí.....	- 24 -
6.1.	Vítr .....	- 24 -
6.2.	Směr větru .....	- 24 -
6.3.	Charakteristika turbulentního proudění .....	- 25 -
6.4.	Zdroje turbulence v atmosféře, mechanická a termická turbulence, uspořádaná konvence .....	- 27 -
6.5.	Vliv terénu na deformaci proudění .....	- 27 -
6.6.	Vliv překážek na proudění.....	- 28 -
7.	Řešení problému .....	- 29 -
8.	Výsledky: .....	- 33 -
8.1.	Denní chody .....	- 33 -
8.2.	Distribuční funkce.....	- 36 -
8.3.	Vliv větru na útlum .....	- 39 -
8.4.	Korelace .....	- 41 -
9.	Závěr.....	- 43 -



## Seznam obrázků:

Obr. č.1: Snellův zákon .....	12
Obr. č.2: Výkonové úrovně optického stroje.....	15
Obr. č.3: Statistický model. ....	16
Obr. č.4: Měřicí pracoviště na Milešovce.....	18
Obr. č.5: Blokové schéma optického spoje.....	19
Obr. č.6: Vysílač v terénu.....	20
Obr. č.7: Anemometry .....	21
Obr. č.8: Dohledoměr Vaisala PWD21 na Milešovce.....	22
Obr. č.9: Větrná růžice.....	23
Obr. č.10: Laminární proudění.....	25
Obr. č.11: Turbulentní proudění.....	25

## Seznam tabulek:

Tab. č.1: Technické parametry optického spoje .....	20
Tab. č.2: Data z dohledoměru .....	30
Tab. č.3: Hodnoty rychlost 3D anemometr-Lampa .....	36
Tab. č.4: Hodnoty intenzita turbulence 3D anemometr –Lampa .....	37
Tab. č.5: Hodnoty rychlost 3D anemometr-Věž .....	37
Tab. č.6: Hodnoty intenzita turbulence 3D anemometr-Věž .....	37
Tab. č.7: Tabulka korelační koeficientu z anemometru – Lampa .....	40
Tab. č.8: Tabulka korelační koeficientu z anemometru –Věž .....	41

## Seznam grafů:

Graf č.1: Spolehlivost anemometrů.....	31
Graf č.2: Průměrné 2D rychlost větru v denním chodu .....	32
Graf č.3: Průměrné hodnoty intenzity turbulence 2D v denním chodu ..	33
Graf č.4: Průměrné směrodatné odchylky vertikální složky .....	34
Graf č.5: Závislost mezi intenzitou turbulence 2D a směrodatnou odchylkou Z .....	34
Graf č.6: Distribuční funkce rychlosti 3D .....	35
Graf č.7: Distribuční funkce intenzity turbulence 3D .....	36
Graf č.8: Průběh rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z a útlumu v listopadu 2008.....	38
Graf č.9: Průběh rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z a útlumu v 23.-28. listopadu 2008.....	38
Graf č.10: Průběh rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z, útlumu a dohlednosti v listopadu 2008 bez mlhy .....	39
Graf č.11: Průběh rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z a útlumu v 23.- 28. listopadu 2008 bez mlhy .....	39

## Seznam zkratek:

OBS.....	optický bezdrátový spoj
IT.....	intenzita turbulence
SMD.....	směrodatná odchylka
LD .....	laserová dioda
IREC.....	infračervená elektroluminiscenční dioda
APD.....	lavinová fotodioda
n.....	index lomu prostředí
$P_{m,RXA}$ .....	střední hodnota přijatého výkonu
$P_{m,TXA}$ .....	střední hodnota vysílaného výkonu
$\alpha_{cel}$ .....	celkový útlum prostředím mezi vysílačem a přijímačem
$\gamma_{prij}$ .....	je celkový zisk přijímače
$\alpha_{cel}$ .....	celkový útlum prostředí
$\alpha_{12}$ .....	útlum šířením volným prostorem
$\alpha_{atm}$ .....	atmosférický útlum
$L_{12}$ .....	vzdálenost vysílače a přijímače
$\alpha_{atmk}$ .....	útlum způsobený konstantními atmosférickými jevy
$\alpha_{atmn}$ .....	útlum způsobený náhodnými atmosférickými jevy
$\alpha_{1,part}$ .....	měrný útlum způsobený částicemi v dB/km
$\gamma_{cel}$ .....	zisk přijímače
$\gamma_{RXA}$ .....	geometrický zisk
$\gamma_{add}$ .....	přídavný zisk je dán rozdílným rozložením optické intenzity na přijímací a vysílací straně
$D_{RXA}$ .....	průměrů hledí (apertur) na přijímací straně
$D_{TXA}$ .....	průměrů hledí (apertur) na vysílací straně
$P_{m,TXA}$ .....	hodnota vyslaného výkonu pro ideální čistou atmosféru
$P_{m,RXA}$ .....	hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru
$\tilde{P}_{m,RXA}$ .....	střední hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru
$P_{sat,RXA}$ .....	saturační práh přijímače
$P_{0,RXA}$ .....	citlivostní práh přijímače
$\Delta$ .....	dynamický rozsah přijímače
M .....	linková rezerva
$P_{m,TXA}$ .....	hodnota vyslaného výkonu pro ideální čistou atmosféru
USA .....	ultrasonic anemometer

# 1. Úvod

V dnešní době se čím dál více používají optické spoje pro jejich velké přenosové kapacity. Optické spoje můžeme rozdělit podle typu přenosové cesty. Jsou tvořeny pomocí optického kabelu nebo bezdrátové. V mé práci jsem se zaměřil na optický bezdrátový spoj.

Optický bezdrátový spoj (OBS) využívá úzkého paprsku světla pro přenášení data atmosférou. Je tvořen vysílačem a přijímačem. Ve vysílači může být použit laser, laserová dioda (LD) nebo infračervená elektroluminiscenční dioda (IRED).

V přijímači bývá použita fotodioda typu PIN nebo lavinová fotodioda (APD). Vysílač vyšle signál namodulovaný na optickou nosnou vlnu a přijímač ji zpracuje. Využívají se pásma 850nm, 1060nm nebo 1550nm, avšak experimentuje se i na jiných vlnových délkách. Zpravidla se jedná o přenos informace v digitální duplexní podobě.

OBS se používá tam, kde by bylo nasazení klasického optického kabelu, ať už z finančních nebo topologických důvodů, nemožné.

Mým úkolem v bakalářské práci bylo zjistit a popsat **vliv větrných turbulencí na útlum optického spoje.**

## 2. Optický bezdrátový spoj

Optický spoj pracuje v oblasti infračerveném spektru, a proto je neviditelný. Tím se stává nebezpečným, protože v přímém kontaktu s okem může dojít k dočasnému nebo i k trvalému následku oslepnutí.

### 2.1. Výhody OBS:

- + Používání OBS zatím není licencované.
- + Pracují v rozsehu optických vlnových délek a nedochází ke znečišťování životního prostředí vyzařováním elektromagnetické energie na radiových frekvencích.
- + Velice tenký svazek paprsku světla (řádově miliradiány) má za následek, že může být rušen nebo odposloucháván jen velmi obtížně. Odposlech by musel být přímo v dráze paprsku a to se dá dobře poznat.
- + Potenciál OBS z hlediska šířky pásma přenosu odpovídá možnostem vláknové optiky a proto jsou článkem kabelových optických sítí.
- + Mohou pracovat v režimu jednofotonového přenosu technikou distribuce kvantových stavů fotonů umožňující aplikaci optické kvantové kryptografie s vysoce zabezpečeným přenosem utajovaných zpráv.
- + Přenosové rychlosti se pohybují v rozmezí 1,5Mbps až 2,5Gbps. [8]

### 2.2. Nevýhody OBS:

- Velká závislost dostupnosti spoje na stavu počasí (odstraňováno výkonovou rezervou, spoje se zálohují).
- Nutnost přímé viditelnosti mezi přijímačem a vysílačem. (krátkodobé výpadky jsou ošetřeny opětovným posláním, informace).
- Jejich dosah je omezený, nejlepší vlastnosti má spoj do 1km, avšak doporučují se i vzdálenosti do 5km, ale nadále se technologie vyvíjí.

### 3. Účinky atmosféry:

Při přímé dohlednosti má na OBS největší vliv počasí. Spoje na vzdálenosti v rozsahu stovek metrů jsou ovlivňovány větrem, mlhou a nízkou oblačností. Spoje delší než kilometr navíc ovlivňuje prudký déšť a sníh. Jejich použitelnost závisí na výkonové bilanci a statistických parametrech atmosféry v místě instalace spoje. Tyto přírodní úkazy mají na OBS dva účinky, a to útlum a rozptyl.

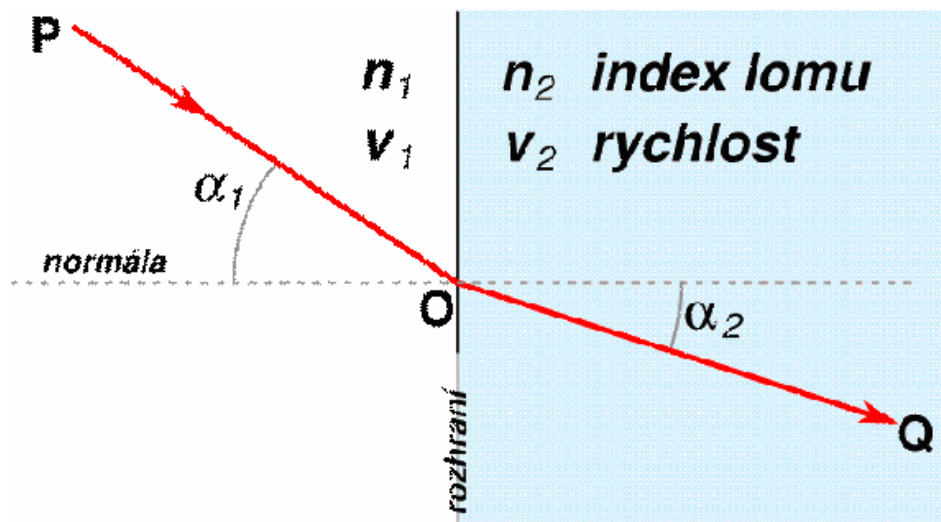
**Útlum** se projevuje pohlcení části energie při průchodu částicemi např. mlhy, deště. **Rozptyl** se projevuje průchodem různými prostředími. Paprsek se při přechodu z jednoho prostředí do druhého odkloní, a tak nedopadne celou svojí částí do přijímače. Toto popisuje **Snellův zákon (Obr.č.1)**: „Uvažujme dvě různá prostředí, jejichž rozhraní je rovinné. Jsou-li indexy lomu těchto dvou prostředí  $n_1$  resp.  $n_2$ , a označíme-li úhly dopadajícího resp. lomeného svazku  $\alpha_1$  resp.  $\alpha_2$  (měřeno ke kolmici rozhraní), pak podle Snellova zákona platí:

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (2.1)$$

nebo také v jiném tvaru ( $v_1$  a  $v_2$  jsou rychlosti šíření vlnění v daném prostředí):

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

Úhly se vždy měří od normály, tj. při kolmém dopadu je  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ . Paprsky se šíří vždy přímočaře.“ [9]



Obr.č.1: Snellův zákon

## 4. Výkonové úrovně OBS

Model optického bezdrátového spoje se skládá ze dvou částí [2]:

- stacionárního modelu - zisku vysílače - přijímače
- statistický model – aktuální atmosférické podmínky přenosového kanálu v místě instalace

### 4.1. Stacionární model spoje:

je vyjádřen rovnicí:

$$P_{m,RXA} = P_{m,TXA} - \alpha_{cel} + \gamma_{prij} [dB] \quad (3.1)$$

kde

- $P_{m,RXA}$  ..... střední hodnota přijatého výkonu
- $P_{m,TXA}$  ..... střední hodnota vysílaného výkonu
- $\alpha_{cel}$  ..... celkový útlum prostředím mezi vysílačem a přijímačem
- $\gamma_{prij}$  ..... je celkový zisk přijímače

Celkový útlum prostředí se skládá z mnoha dílčích útlumů. Základní rozdělení je útlum šířením volným prostorem  $\alpha_{12}$  a na útlum způsobený atmosférickými jevy  $\alpha_{atm}$ .

$$\alpha_{cel} = \alpha_{12} + \alpha_{atm} [dB] \quad (3.2)$$

Útlum  $\alpha_{12}$  je dán šířením optické vlny a prakticky závisí jen na vzdálenosti  $L_{12}$  vysílače a přijímače. Je proto pro daný spoj konstantní.

Útlum  $\alpha_{atm}$  je závislý na stavu atmosféry (mlha, déšť, sněžení, turbulence, apod.) a samozřejmě též na  $L_{12}$ . Je tedy proměnný v čase.

$$\alpha_{atm} = \alpha_{atmk} + \alpha_{atmn} [dB] \quad (3.3)$$

- $\alpha_{atmk}$  ..... útlum způsobený konstantními atmosférickými jevy
- $\alpha_{atmn}$  ..... útlum způsobený náhodnými atmosférickými jevy

Jestliže budeme uvažovat o neměnné homogenní atmosféře, je možné vyjádřit útlum atmosférickými částicemi jako funkci vzdálenosti:

$$\alpha_{part} = \alpha_{1,part} L_{12} [dB], \quad (3.4)$$

kde

- $\alpha_{1,part}$  je měrný útlum způsobený částicemi v dB/km
- $L_{12}$  je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

Zisk přijímače  $\gamma_{cel}$ :

$$\gamma_{cel} = \gamma_{RXA} + \gamma_{add} = \left| 20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{TXA}} \right| + \gamma_{add} [dB] \quad (3.5)$$

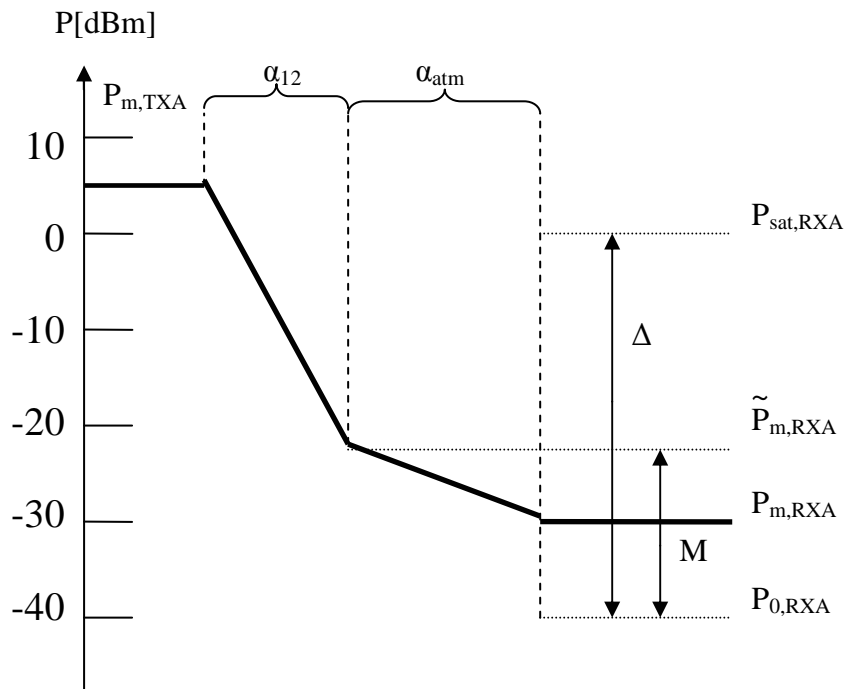
$\gamma_{RXA}$  geometrický zisk

$\gamma_{add}$  přídavný zisk je dán rozdílným rozložením optické intenzity na přijímací a vysílací straně.

$D_{RXA}$  průměrů hledí (apertur) na přijímací straně

$D_{TXA}$  průměrů hledí (apertur) na vysílací straně

## Výkonové úrovně optického spoje:



Obr. č. 2: Výkonové úrovně optického stroje

$P_{m,TXA}$  hodnota vyslaného výkonu pro ideální čistou atmosféru.

$P_{m,RXA}$  hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru.

$\tilde{P}_{m,RXA}$  střední hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru

$P_{sat,RXA}$  saturační práh přijímače

$P_{0,RXA}$  citlivostní práh přijímače

Rozdíl  $P_{sat,RXA}$  a  $P_{0,RXA}$  se nazývá **dynamický rozsah přijímače  $\Delta$** .

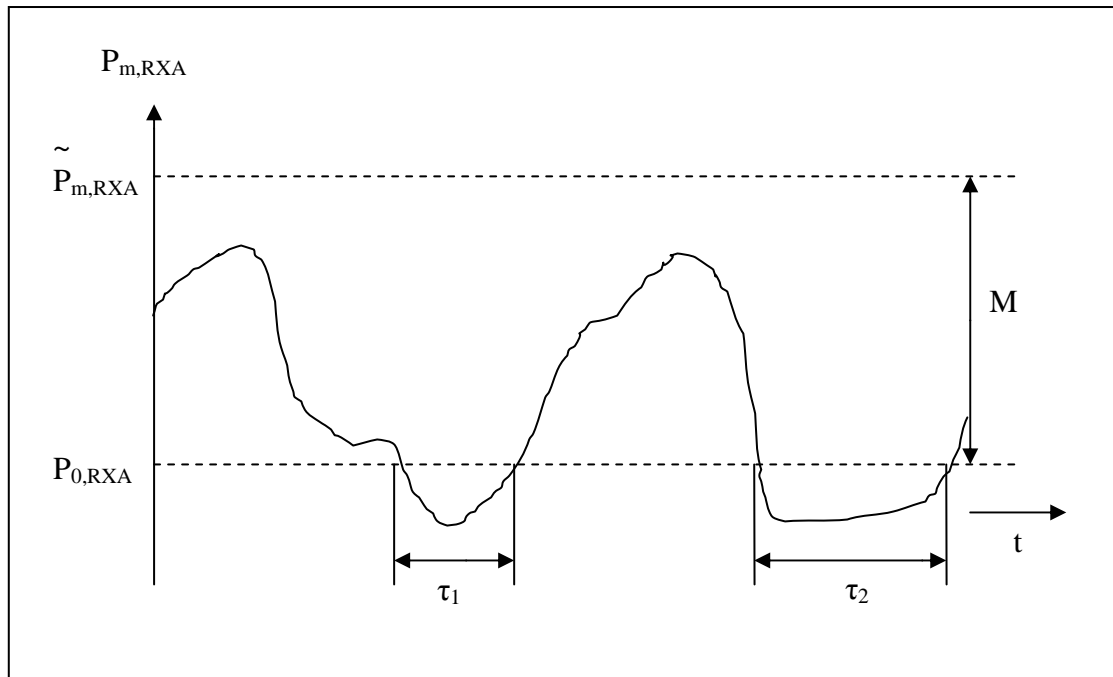
Rozdíl mezi  $\tilde{P}_{m,RXA}$  přijatým výkonem pro ideální čistou atmosféru a  $P_{0,RXA}$  prahem citlivosti přijímače je tzv. **linková rezerva M**.

## 4.2. Statický model

V tomto modelu se řeší útlumy spojené s počasím. Na optický spoj mají vliv mlhy, deště, sníh, větrné turbulence atd. Součet těchto útlumů označujeme  $\alpha_{atm}$ . Jestliže tento útlum přesáhne linkovou rezervu spoje M nastává výpadek spojení, protože



přijatý výkon spadne pod hranici citlivostního prahu přijímače. Z. obr.č.3 je patrné, že při čase  $\tau_1$  a  $\tau_2$  je výpadek spojení.



Obr. č. 3: Statistický model.

**Spolehlivost spoje je definována výrazem:**

$$P_{av} = \frac{T - T_{un}}{T} = \frac{T - \sum \tau_i}{T} * 100[\%] \quad (3.6)$$

kde  $\tau_i$  jsou časové úseky jednotlivých výpadků zaznamenané během dostatečně dlouhé periody. T je perioda průběhu.

### 4.3. Vliv větrných turbulencí na OBS

Atmosférická turbulence má za následek mnoho efektů způsobících, že kolísá výkon v optické signálu. U bezdrátové laserové komunikaci je zasažena především rozptylem. Řada jevů v atmosféře, jako jsou rozptyl, absorpce a turbulence, ovlivňuje laserový paprsek šířící se bezdrátovým optickým spojem (OBS) [3].

Turbulence a rozptyl je důležité vzít v úvahu. Při dnešním používání velikosti vlnových délek můžeme absorpci zanedbat. Nejdůležitější účinky atmosférických turbulencí na laserovém paprsku jsou: **fázový posun, zkreslení, paprsek se rozšiřuje, potuluje a přerozděluje intenzitu uvnitř paprsku.** Dočasné přerozdělení ze síly,

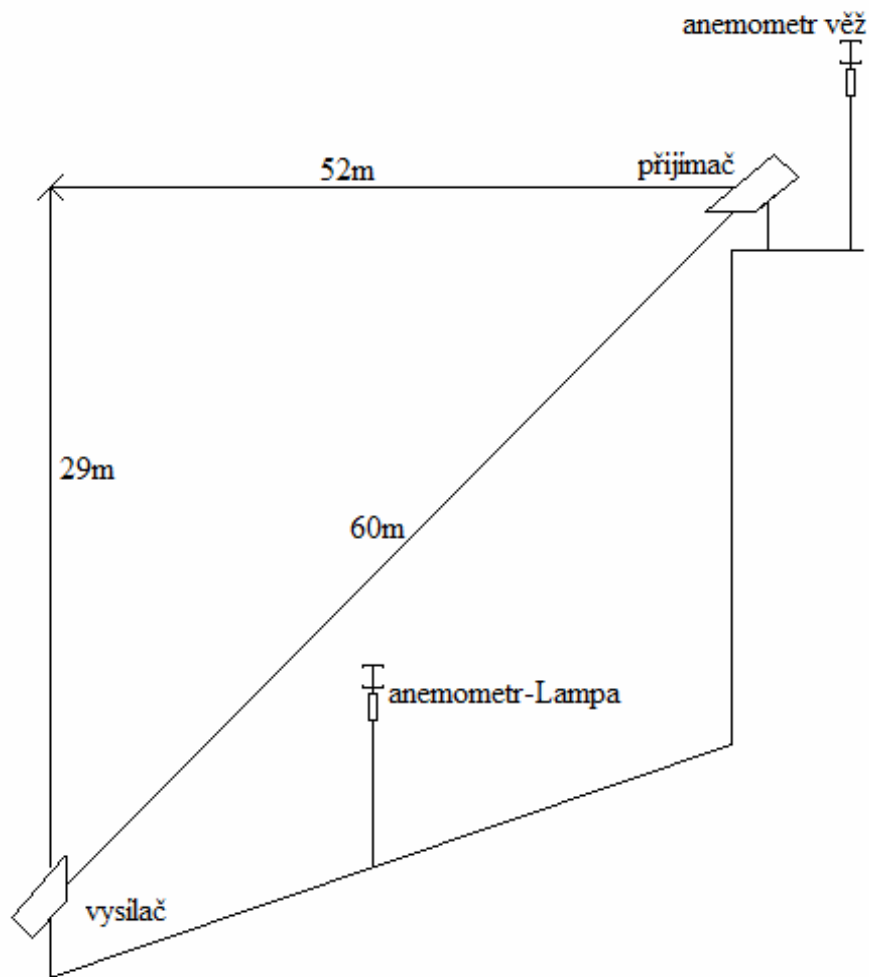
známé jako turbulence, vyplývá z chaotického toku výměny vzduchu a z teplotních gradientů uvnitř optické cesty způsobené změnou teploty vzduchu a hustoty. Zóny (často označované jako víry) v různých velikostech a s odlišnými hustotami působí jako čočky rozptylu světla od své určené cesty. Potom části laserového paprsku mohou jít mírně různými cestami a na přijímači se pak sčítají s rozdílnou fází.. Rekombinace (skládání) je destruktivní nebo konstruktivní v konkrétním okamžiku a má za následek prostorové přerozdělení signálu, následkem toho se snižuje optický výkon.

## 5. Observatoř Milešovka

Úkolem této práce je analyzovat data z experimentálního optického spoje na Milešovce, který byl vyroben na VÚT Brno a je provozován Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR.

Milešovka je nejvyšší hora Českého středohoří s nadmořskou výškou 837 m.n.m. S průměrnou rychlostí větru 8,5 m/s (= 30,5 km/hod) je vrchol hory největrnějším místem České republiky, bezvětří zde bývá v průměru jen 8 dní v roce.

V roce 1905 byla na vrcholu zřízena meteorologická stanice a u ní pak devatenáct metrů vysoká rozhledna. Dnes je na vrcholu hory umístěno stálé meteorologické pracoviště Ústavu fyziky atmosféry (Obr.č.4).



Obr. č.4: Měřící pracoviště na Milešovce

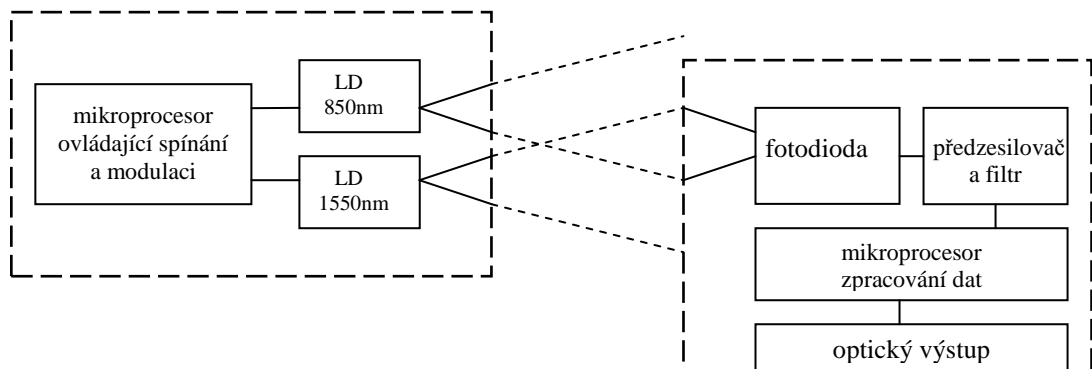
## 5.1. Optický spoj:

Pracuje v simplexním provozu na vzdálenosti 60m. Instalační místo je situováno v místě s nejdrsnějším klimatem v České republice. Dostí svise orientovaná trasa dovolí analyzování dopadu z různé atmosférické vrstvy na přenosu signálu (Obr. č.5).

### 5.1.1. Vysílač:

Vysílač (Obr.č.6) v sobě obsahuje dvě oddělené optické antény, které používají laserové diody s vlnovými délkami 850nm (kanál 2) a 1550nm (kanál 1). Obě laserové diody jsou modulované a jejich spínání zajišťuje mikroprocesor [6, 7].

Laserové paprsky mají odchylku 6mrad pro 850nm a 12mrad pro 1550nm. Průměr apertur obou antén je 23mm. Pro použitou vzdálenost 60m jsou paprsky dostatečně široké na to, aby nebyl přenos citlivý na drobné vychýlení paprsku z osy.



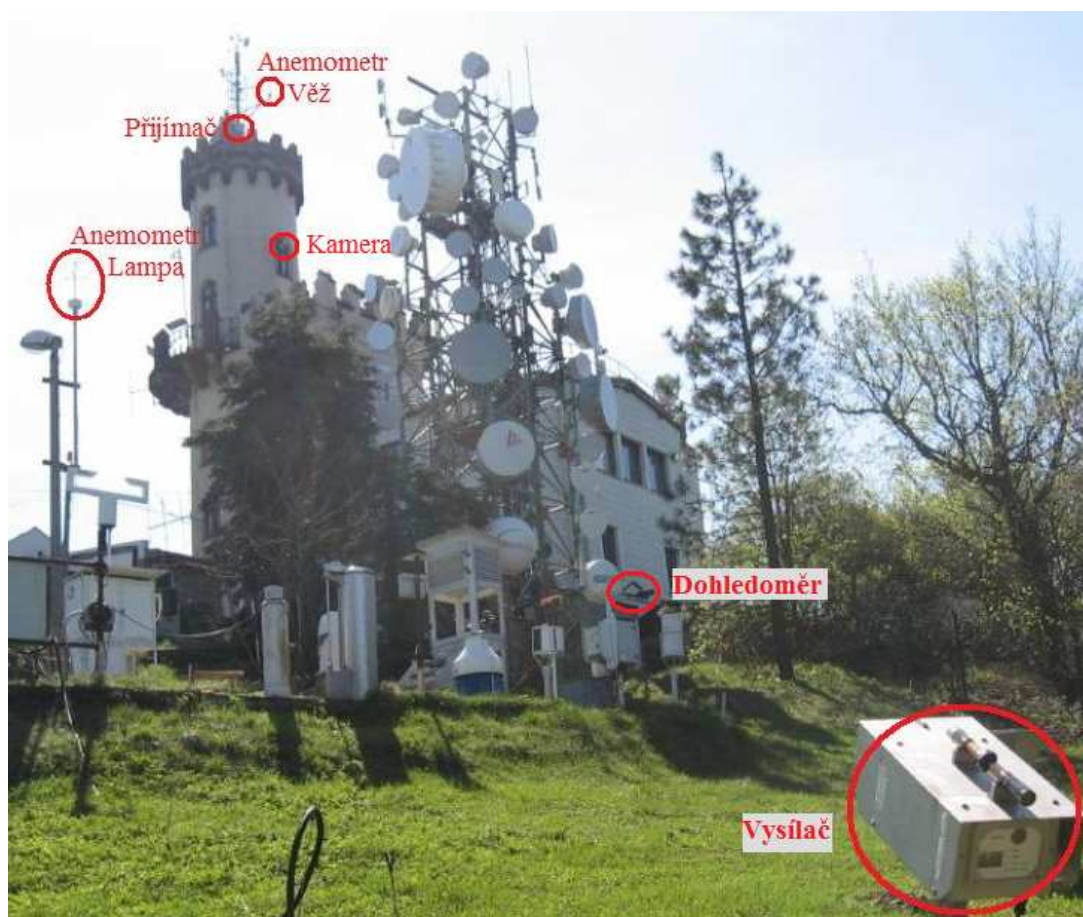
Obr.č.5: Blokové schéma optického spoje

### 5.1.2. Přijímač

Přijímač je složen z fotodiody, předzesilovače a kontrolní jednotky pro ukládání a vyhodnocování naměřených dat. Průměr čočky přijímače je 60mm. Pro svojí schopnost reagovat na široké spektrum vlnových délek byla vybrána InGaAs fotodioda FGA10. Pro zpracování signálu byl vybrán logaritmický detektor s dynamickým rozsahem 90dB (Tab. č.1).

	CH2	CH1
Laserová dioda	DL5032	RLT1550-15G
Vlnová délka $\lambda$	850nm	1550nm
Vyzářený výkon $P_{m, TXA}$	5mW	5mW
Divergence svazku $\varphi_t$	12mrad	6mrad
Apertura na vysílači $D_{TXA}$	23mm	23mm
Fotodioda	PIN InGaAs FGA 10	
Apertura na přijímači $D_{RXA}$	60mm	
Citlivost fotodiody	0,2 A/W	0,94 A/W
Ekvivalentní šumový výkon NEP	$2,5 \times 10^{-14}$ W/Hz (900nm)	

Tab. č.1:Technické parametry optického spoje



Obr.č.6: Vysílač v terénu

## 5.2. Anemometry

Pro měření korelace větru a útlumu na OBS na Milešovce byl vybrány dva 3D sonické anemometry USA-1 (ultrasonic anemometer) od firmy METEK (SRN) (Obr. č.7).



Obr.č.7: Anemometry

Zvukové anemometry jsou robustními, rychlými a spolehlivými senzory větru. V Metek USA-1 anemometr využívá ultrazvukové pulsy na tři nerovnoběžné cesty paprsku pro měření rychlosti a směru větru, případně třech ortogonálních složek větru  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Vzdálenost vysílače a přijímače je od sebe 0,175 m. Hmotnost tohoto anemometru je 2,3 kg. Tento anemometr nemá žádné pohyblivé části a jeho plocha je malá. Jeho výhodou je větší odolnost proti námraze než u miskovitého anemometru. Navíc přístroj používá vnitřní elektrický ohřev. Každá hlava s čidlem má topení s výkonem 50W. Sonický anemometr má velmi malou časovou konstantu. Na druhou stranu k jeho nevýhodám patří znehodnocené měření při atmosférických srážkách.

### **Princip funkce:**

Jeho rychlost zvuku pohybujícím se klidným atmosférickým prostředím známe. Jakmile se vzduch začne pohybovat, rychlost zvuku se mění. Ve třech osách v kol-

mých na sebe jsou proti sobě orientovaný vysílač-přijímač zvuku. To umožňuje určit rychlost větru ve třech osách.



Obr. č.8: Dohledoměr Vaisala PWD21 na Milešovce

### 5.3. Dohledoměr Vaisala PWD21

Vysílač a přijímač nejsou ve stejné horizontální ani vertikální ose. Senzor pracuje na principu rozptylu laserového paprsku o atmosférické částice. Vysílač vyšle laserový paprsek, a když je například mlha paprsek o kapičky vody rozptýlí a část výkonu dopadne i na přijímač. Podle velikosti přijatého signálu, přístroj určí dohlednost.

Při jasném počasí přijímač nedetekuje žádný odražený výkon. Nápadné kryty natočeny směrem k zemi přístroj dobře chrání proti shromažďování vody nebo sněhu u čoček a tím zamezují ovlivňování měření.

Tento přístroj začal měřit od 1.1.2009. Pro měsíc listopad 2008 a prosinec 2008 jsem dostal data o dohlednosti od kolegy Vladimíra Brázdy, se kterým jsme provedli subjektivní hodnocení intenzity mlhy z fotografií pořízených kamerou, která byla umístěna v ose spoje asi 4m pod přijímačem. Fotografie z kamery byly snímány každých pět minut. Hodnocení provedl podle následujícího klíče:

- 3 - žádná mlha
- 2 - mírná mlha
- 1 - střední mlha
- 0 - hustá mlha

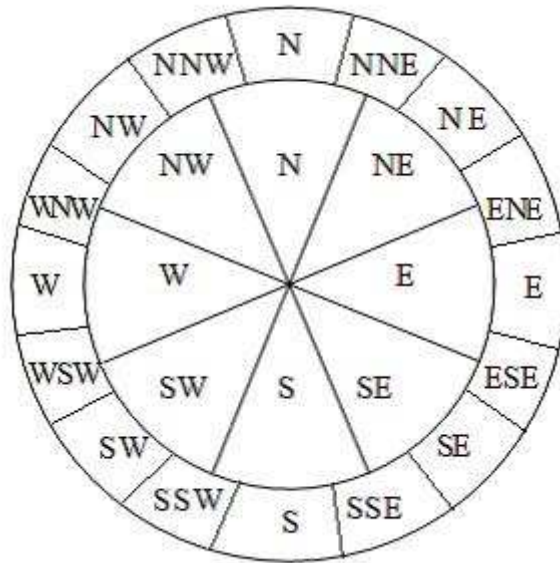
## 6. Teorie větru a větrných turbulencí

### 6.1. Vítr

„Víte je pohyb částic vzduchu vzhledem k zemskému povrchu v daném časovém okamžiku. Částicemi rozumíme tak velký soubor molekul, který lze považovat za homogenní objem vzduchu. Vítr v libovolném bodě pozorování lze charakterizovat: směrem větru (odkud vane), rychlostí větru a nárazovostí větru (okamžitá odchylka rychlosti větru o 5 a více m/s).“ [5, s. 3]

### 6.2. Směr větru

Směr větru se nejčastěji vyjadřuje větrnou kružnicí, která může být 36-, 32-, 16-, 12-, nebo 8-dílnou směrovou růžicí. Směry se často označují začátečními písmeny anglických názvů. N-north (sever), E-east (východ), S-south (jih), W-west (západ). Jejich kombinace se označují mezisměry (Obr. č.9).



Obr. č.9: Větrná růžice

Měření ukazují, že jak rychlost, tak i směr větru prodělávají rychlé neperiodické změny, zvláště pak v přízemní vrstvě atmosféry. Tyto změny jsou způsobeny vznikem, přemístěním a zánikem složek všeobecné cirkulace atmosféry a dále jsou vyvolány turbulentním charakterem proudění. V reálné atmosféře má proudění převážně turbulentní charakter. Pro takové proudění jsou typické turbulentní pulzace rychlosti větru.



### 6.3. Charakteristika turbulentního proudění

„Proudění podléhající náhodným fluktuacím, které lze poněkud zjednodušeně představit v podobě chaoticky se pohybujících vírů různých velikostí, nazýváme turbulentní. Jestliže do proudící tekutiny přimísíme vhodné barvivo, jenž nám umožní zviditelnit proudnice, potom tyto mají v případě turbulentního proudění zcela nepravidelný tvar rychle se měnící v čase a nelze je prakticky sledovat na větší vzdálenosti. Turbulentní proudění tímto způsobem kontrastuje s prouděním laminárním, při němž jsou proudnice v pohybující se tekutině hladké, stabilní a můžeme je sledovat do značných vzdáleností od místa, kde jsme k tekutině přidali barvivo.

Z teoretických závěrů i z praktické zkušenosti vyplývá, že proudění se stává turbulentním tehdy, jestliže setrvačné síly v proudící tekutině nebo proudnici tekutiny jsou dostatečně velké ve srovnání se silami vazkého tření, tzn. **Reynoldsovo číslo  $Re$** .“ [1, s. 71]

Reynoldsovo číslo je číslo, které dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu (tedy odpor prostředí v důsledku vnitřního tření). Pomocí toho čísla je možné určit zda je proudění tekutiny laminární a nebo turbulentní. Čím je  $Re$  číslo vyšší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor.

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad (5.1)$$

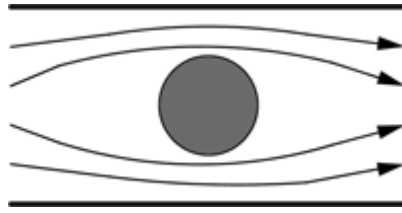
$d$  ... označuje průměr trubice

$v_s$  ... je střední hodnota proudění kapaliny v daném průřezu

$\nu$  ... je kinematická viskozita

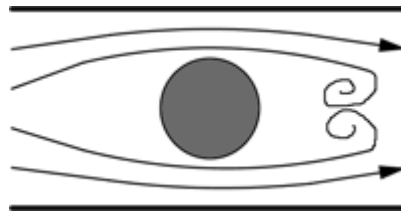
Pro velké hodnoty  $Re$  je proudění turbulentní, pro nízké hodnoty je proudění laminární. Při  $Re \rightarrow \infty$  je proudění potenciálové.

„**Laminární proudění** (Obr.č.10) nastane, když jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se. Částice se pohybují vedle sebe jakoby ve vrstvách - „destičkách“ (destička = lat. lamina), které se vzájemně nepromíchávají.“ [10]



Obr.č. 10: Laminární proudění

**Turbulentní proudění**(Obr.č.11) je takové proudění, při kterém se proudnice navzájem *promíchávají*. Částice vykonávají při proudění kromě posouvání i *složitý* vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Rychlosti jednotlivých částic kapaliny se nepravidelně mění.



Obr.č.11: Turbulentní proudění

„**Potenciálové proudění** je takové proudění, kdy lze rychlostní pole kapaliny vyjádřit jako gradient určitého skalárního pole. Bývá označováno jako nevířivé proudění (nedochází ke vzniku vírů).“ [11]

„Skutečné proudění v atmosféře má zpravidla velmi nepravidelnou, statisticky náhodnou strukturu. Okamžité hodnoty jeho rychlosti se v každém bodě rychle mění s časem a časové peptidy nejkratších z těchto změn řádově odpovídají  $10^{-1} - 10^{-2} s$ , popřípadě i méně. Abychom mohli takto fluktuací rychlosti proudění vhodně vyjádřit, budeme předpokládat, že skutečná okamžitá rychlost proudění  $v$  je dána součtem střední rychlosti  $\bar{v}$  za určitých v hodně zvolený časový interval a turbulentní složky  $v'$  se složitým, často **negaussovským rozložením fluktuací**, která se překládá přes základní proudění a je důsledkem existence chaotického se pohybujících turbulentních vírů různých měřítek:

$$v = \bar{v} + v' \quad (5.2)$$

nebo ve složkách:

$$v_x = \bar{v}_x + v'_x \quad (5.3)$$

$$v_y = \bar{v}_y + v'_y \quad (5.4)$$

$$v_z = \bar{v}_z + v'_z \quad (5.5)$$

Střední rychlost proudění je dána vztahem:

$$\bar{v}(x, y, z) = \frac{1}{t^*} \int_{t-\frac{t^*}{2}}^{t+\frac{t^*}{2}} v(x, y, z) dt \quad (5.6)$$

a představujeme tak průměrnou rychlost proudění v daném bodě za vhodně zvolený časový interval délky  $t^*$ . Tento interval musí být dostatečně dlouhý, abychom získali reprezentativní hodnotu, která se nemění moc rychle s časem, ale na druhou stranu nesmí být  $t^*$  na tolik velké, aby došlo k vyhlazení významných časových změn střední hodnoty rychlosti proudění.“ [1, s. 72]

#### 6.4. Zdroje turbulence v atmosféře, mechanická a termická turbulence, uspořádaná konvence

„Příčiny vzniku turbulence v atmosféře jsou jak mechanické, tak i termické povahy. Tzv. **mechanické turbulence** je v mezní vrstvě produkována třením proudícího vzduchu o zemský povrch, které vytváří vertikální gradient velikosti rychlosti proudění. Tento gradient je v interakci s polem fluktuací rychlosti proudění i teploty vzduchu a projevuje se neturbulentním přenosem hybnosti od výše ležících a rychleji se pohybujících vrstev vzduchu směrem dolů. Případné instabilní teplotní vrstvení má rovněž za následek vznik a rozvoj turbulentních vírů a představuje tak termický mechanismus produkující turbulenci. Stabilní teplotní zvrstvení naproti tomu tlumí rozvoj neuspořádaných turbulentních pohybů a lze ho tedy považovat za negativní zdroj turbulence.“ [1, s. 73]

#### 6.5. Vliv terénu na deformaci proudění

Při proudění vzduchu přes vertikálně členitý terén dochází k optékání a přetékání vzduchu kolem a přes jednotlivé terénní tvary. Při tom vznikají procesy s kladnou a zápornou akcelerací. Důležitou úlohu při těchto procesech hraje vertikální teplotní

gradient. Například, když vezmeme izolovanou horu s kruhovým půdorysem. Je dokázáno:

- Zvýšení rychlosti větru na vrcholu hory činí 80%, porovnáno s neovlivněným profilem rychlosti větru před horou.
- Zmenšení rychlosti větru před a za horou (větrný stín hory) činí 20 až 40% porovnáno s neovlivněným profilem rychlosti větru před horou. [5]

## 6.6. Vliv překážek na proudění

Překážky typu dům, strom, keř apod. způsobují, že natékající proudění směrem větru, mění se jeho rychlost a vzniká zóna turbulence.

Setká-li nenatékající proudění s překážkou, pak zčásti ji obtéká, zčásti přetéká, a jeli možno zčásti, proudí skrz překážku.

Máme-li izolovanou překážku např. stěnu o výšce  $H$ . pak při natékání překážka vzduch vytlačuje nahoru. Při tom se před překážkou vytvoří relativně malá turbulentní zóna. Ze zhuštění proudnic dojde k tomu, že se vzduchové částice nad překážkou zrychlují. Na závětrné straně překážky se postupně spojují složky přetékačícího a obtékajícího vzduchu a tvoří se turbulentní zóna. Tato zóna je dlouhá okolo pětinásobku výšky překážky. Čím více je překážka propustnější tím turbulentní zóny se zmenšují. [5]

## 7. Řešení problému

Všechny měřicí přístroje jsou propojeny s meteorologickou observatoří Milešovka. Tato observatoř je v přímém spojení s Ústavem fyziky a atmosféry AVČR pomocí internetu. To bylo ulehčení, proto že jsme měli přímý přístup k datům bez opětovného dojíždění.

Pro zpracování dat z anemometru jsem dostal programy od RNDr. Jaroslava Svobody, CSc. Tyto programy zkomprimovali velikost datových souborů a provedli základní výpočty.

### 3D sonicky anemometr USA-1

Pracovní názvy byli zvoleny podle místa svého pracoviště anemometr-Lampa a anemometr-Věž.

**Anemometr -Věž** je umístěný na nejvyšší části věže asi 2m od přijímače OBS, a tím pádem je na nejlepším místě pro měření větru. Tento anemometr z pohledu optického spoje má menší váhu (než anemometr-Lampa) ze dvou důvodů:

1. anemometr je umístěn až za trasou OBS.
2. změřený vítr a větrné turbulence mají menší negativní vliv na OBS u přijímače než u vysílače.

**Anemometr -Lampa** je umístěný na lampě skoro v trase OBS asi v první třetině od vysílače.

Oba anemometry měří tři ortogonální složky větru  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a sonickou teplotu. Anemometry měří teplotu z rychlosti šíření zvuku ve větru, která je tepelně závislá, - tzv. sonická teplota. Sonická teplota a teplota změřená teploměrem se může trochu lišit. Osa  $x$  je orientovaná na sever. Vítr zcela nepravidelně rychle mění směr a rychlost v čase, proto měříme tyto parametry desetkrát za jednu sekundu. To nám zaručuje, že máme zcela vše zaznamenané. Tyto hodnoty jsou zaznamenané do textového souboru. Každý den je v novém souboru. Při výpadku přístroje a znovu zapnutí se založí nový soubor.

#### Ukázka surových dat z anemometru:

081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-135 y =102 z =34 t =1091

081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-130 y =104 z =29 t =1093  
 081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-125 y =109 z =47 t =1092  
 081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-128 y =123 z =35 t =1097  
 081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-136 y =113 z =35 t =1093  
 081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-120 y =111 z =14 t =1093  
 081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-120 y =126 z =43 t =1088  
 081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-120 y =97 z =30 t =1087  
 081103000000 Střední čas (běžný čas) M:x =-122 y =105 z =35 t =1084  
 081103000001 Střední čas (běžný čas) M:x =-131 y =84 z =39 t =1102

Prvních dvanáct hodnot je datum rok-měsíc-den-hodina-minuta-sekunda, dále jaký je to čas dál složky x,y,z a teplota hodnoty těchto 4 veličin jsou zaznamenané v setinách metru.

Tyto data byly zpracována programem metekN1.exe. jelikož data byla nepřehledná z důvodu napsaných přebytečných hodnot a navíc některé dny byly z důvodu výpadku rozsekány do více souborů.

**Ukázka dat po zpracování programem metekN1.exe:**

2300	3599	-135	102	34	1091	12341
2310	3599	-130	104	29	1093	12341
2320	3599	-125	109	47	1092	12341
2330	3599	-128	123	35	1097	12341
2340	3599	-136	113	35	1093	12341
2350	3599	-120	111	14	1093	12341
2360	3599	-120	126	43	1088	12341
2370	3599	-120	97	30	1087	12341
2380	3599	-122	105	35	1084	12341
2390	3599	-131	84	39	1102	12341

1.sloupec 1. dvojčíslí jsou hodiny 2. dvojčíslí jsou setiny; 2.sloupec jsou sekundy; 3.sloupec je osa x; 4.sloupec je osa y; 5.sloupec je osa z; 6.sloupec je sonická teplota; 7. sloupec první čtyři čísla je kontrola jestli je tento řádek reálné hodnoty => 1234 = správně. Poslední číslo nabývá hodnot 1 anemometr nevyhříván nebo 2 anemometr vyhříván.

Pro další krok byla data zpracována programem metek1\_turbulence, zde byly provedeny výpočty pro zkoumání větru. Jako je 2D a 3D rychlost větru m/s, 2D a 3D intenzita turbulence, turbulentní energie, průměrný směr větru 2D, průměrná složka x, y, z, t m/s, směrodatný odchylky x,y,z,t, směru větru...

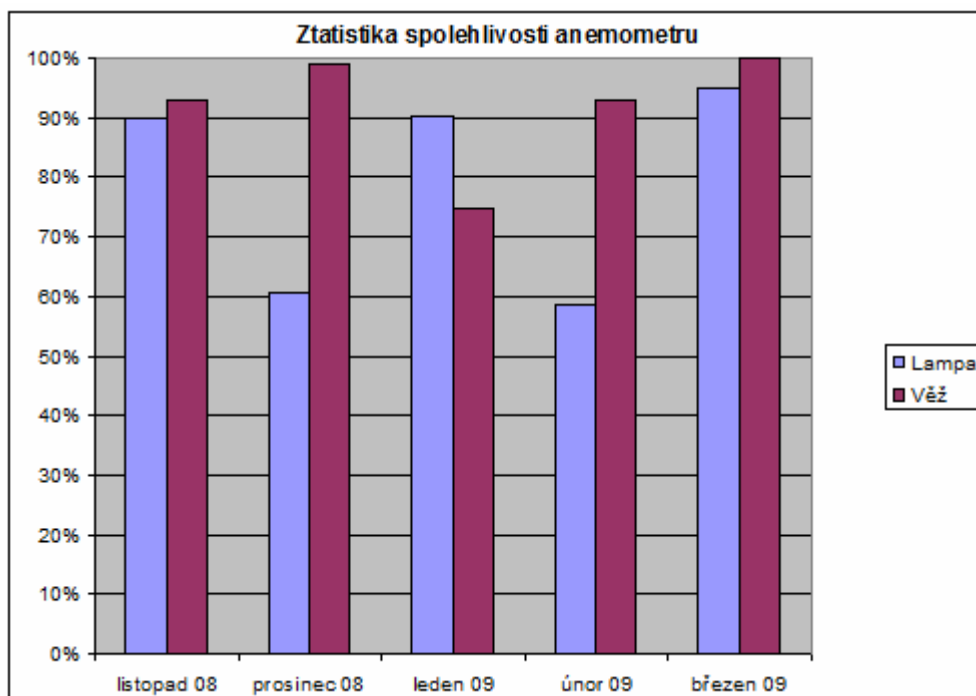
V této práci jsem zpracovával data od 3. Listopadu 2008, když anemometry začaly spolehlivě měřit a skončil jsem 31. března. Data jsem průměroval po 5, 15 a 60 minutách, jelikož jeden anemometr provedl měření 86400krát za den.

Dohledoměr PWD21 - přístroj zpracovává přes 60 různých měření jako jsou například data o teplotě, o vlhkosti vzduchu, srážkách, tlak atd., já jsem si vzal jen sloupec o dohlednosti.

Ukázka dat z dohledoměru Vaisala PWD21

Datum	Čas	PW_VIS10
2.1.2008	02:45	2000
2.1.2008	03:00	2000
2.1.2008	03:15	2000
2.1.2008	03:30	2000
2.1.2008	03:45	1880
2.1.2008	04:00	1167
2.1.2008	04:15	671
2.1.2008	04:30	677
2.1.2008	04:45	1076
2.1.2008	05:00	855
2.1.2008	05:15	1371
2.1.2008	05:30	805
2.1.2008	05:45	1343
2.1.2008	06:00	2000
2.1.2008	06:15	997
2.1.2008	06:30	877
2.1.2008	06:45	513
2.1.2008	07:00	599
2.1.2008	07:15	682
2.1.2008	07:30	777
2.1.2008	07:45	2000

Tab. č.2:Data z dohledoměru



Graf.č.1: Spolehlivost anemometrů.

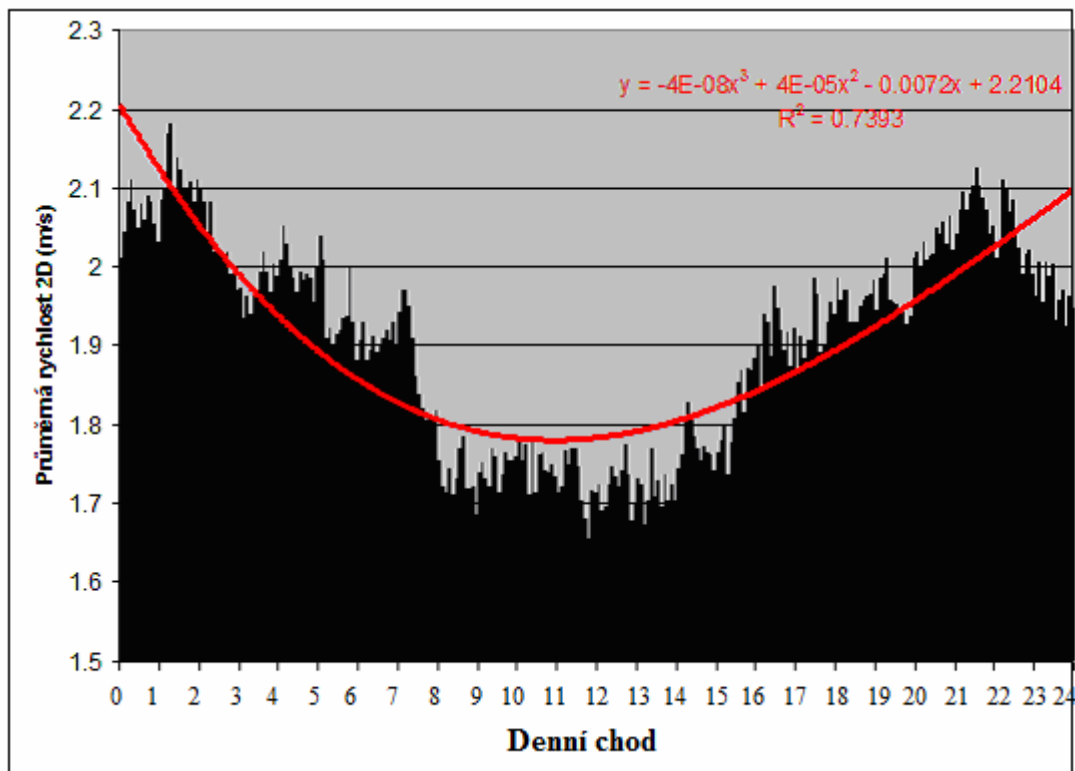
V tomto grafu (Graf č.1) vidíme nejen statistiku, kdy anemometry měřily a kdy ne, ale je tam vzata i statistika, kdy anemometry měly chybu měření. Anemometr-Lampa má celkový průměr 78.84% a anemometr-Věž 91.91%, což je dostatečná spolehlivost dat pro další zpracování.



## 8. Výsledky:

### 8.1. Denní chody

Při zkoumání vlivu větru na útlum na optickým bezdrátovým spoji (OBS) nás hlavně zajímá rychlost 2D a 3D, Intenzita turbulence (IT) 2D a 3D, Směrodatná odchylka (SMD) Z a Sonická teplota. Nejdřív jsem provedl statistiku větru a dále jsem se zabýval, jak tyto výsledky, ke kterým jsem došel, ovlivňují útlum OBS.

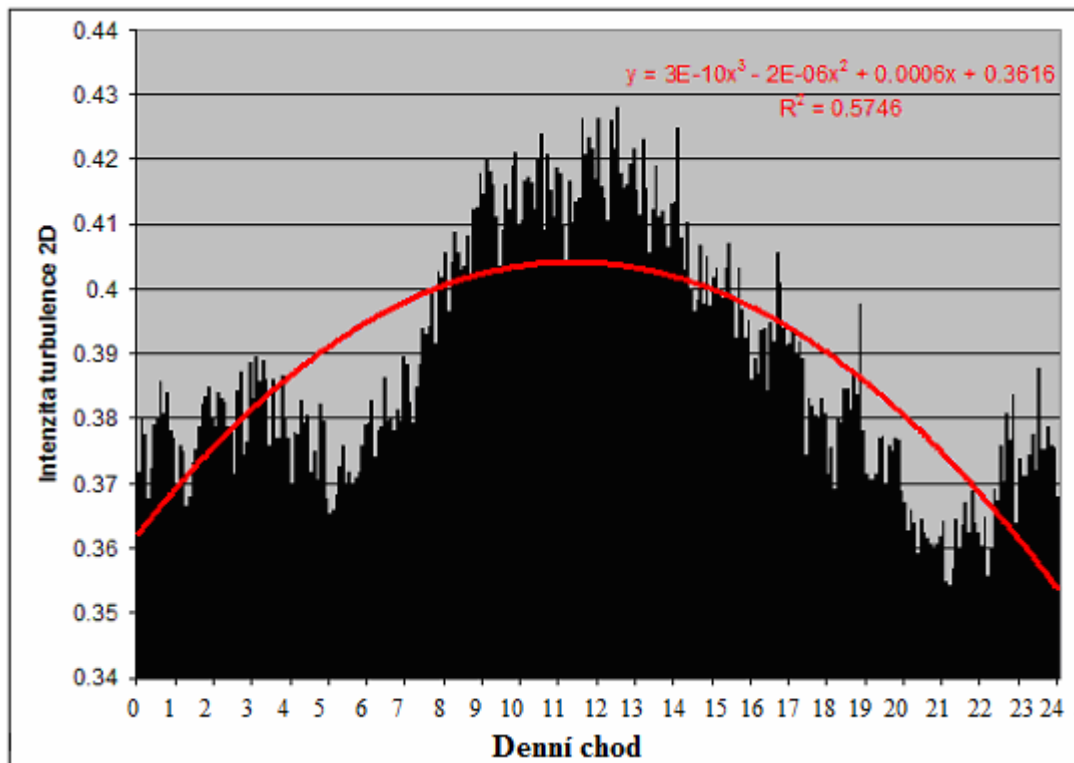


Graf č.2: Průměrné 2D rychlost větru v denním chodu

Tento graf (Graf č.2) ukazuje denní chod průměrné 2D rychlosti větru po pěti minutách za pět měsíců, co jsem zkoumal z anemometru-Lampa. Můžeme si všimnout, že zde vítr průměrně nedosahuje žádné velké rychlosti - 1-2m za sekundu.

Další zajímavou vlastností je, že vítr začne okolo půlnoci klesat a klesá až do poledne a pak začne zase sílit až pozdních nočních hodin.

R je hodnota spolehlivosti a vyjadřuje podobnost mezi grafem a spojnicí trendu. Nabývá hodnot mezi 0 a 1, přičemž 1 značí absolutní shodu. Y je rovnice křivky.

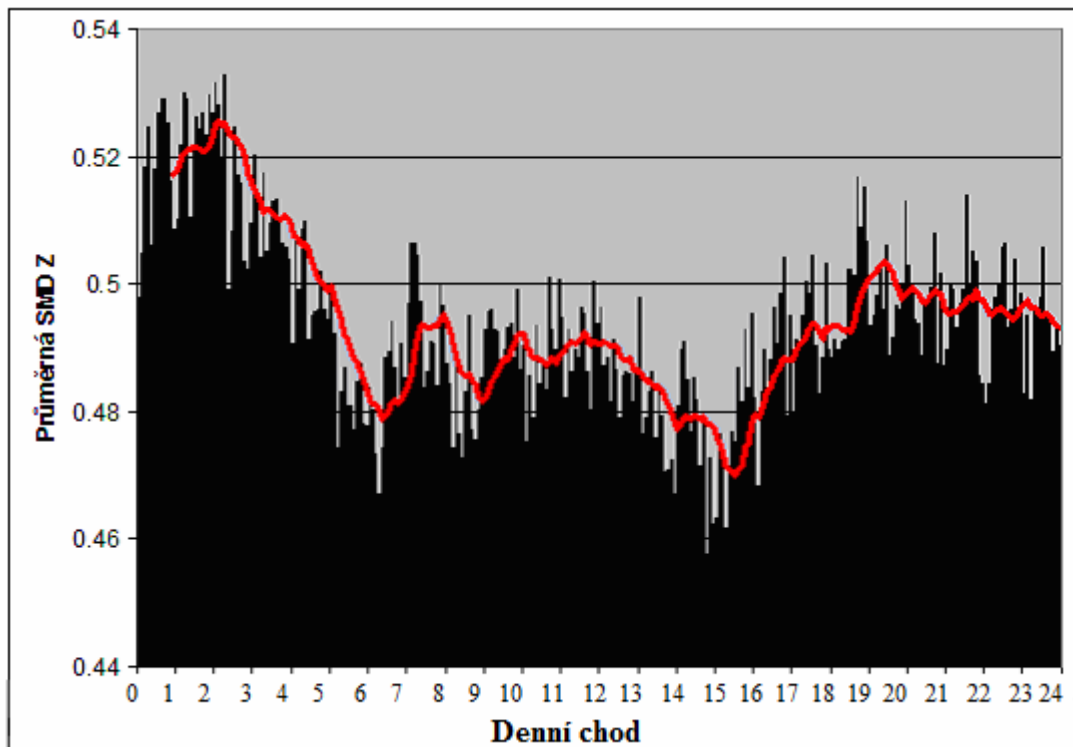


Graf č.3: Průměrné hodnoty intenzity turbulence 2D v denním chodu

Tento graf (Graf č.3) ukazuje denní chod průměrné intenzity turbulence 2D (IT 2D) větru po pěti minutách za pět měsíců, co jsem zkoumal z anemometru-Lampa.

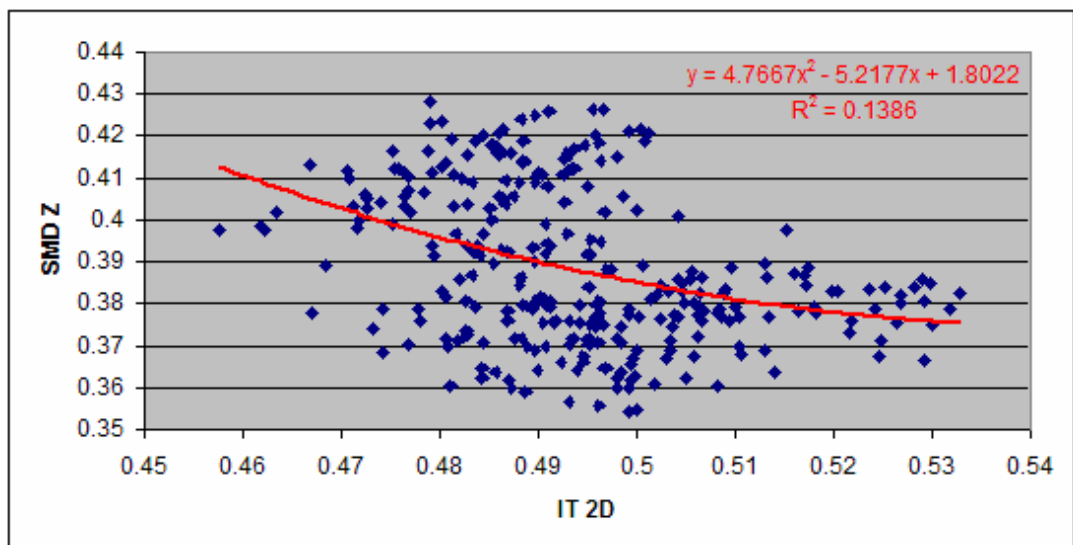
Intenzita turbulence nikdy nedosahuje velkých hodnot a to tento graf potvrzuje. Důležité zjištění je její průběh. Hodnota IT 2D v nočních hodinách se drží do 0.39, ale přes den její velikost vyletí nahoru a okolo poledne má maximum, a pak zase začne klesat. Tímto jsme si ověřili denní chod turbulence uváděný v literaturách. Můžeme si všimnout, když porovnáme IT 2D s rychlostí větru, že jejich průběhy jsou přesně opačné. To nám ukazuje nepřímou úměru, čím větší vítr tím menší intenzita turbulence a obráceně. To nám potvrzuje jejich korelace = -0,8481 IT 2D a rychlost 2D. Mínus znamená že jsou opačné a v 85% se shodují.

Graf č.4 ukazuje denní chod průměrné směrodatné odchylky vertikální složky rychlosti Z po pěti minutách za pět měsíců co jsem zkoumal z anemometru-Lampa. SMD Z jako intenzita turbulence nikdy nedosahuje velkých hodnot a to tento graf potvrzuje. SMD Z má zajímavý průběh denního chodu. Ten se dá rozdělit do tří opakujících se oblastí. Tyto oblastí vypadají tak, že jde z minima do maxima po jeho dosáhnutí se zase vrací do minima. První oblast začíná okolo půlnoci, druhá začíná okolo 5.- 6.hodiny a poslední začíná okolo 15. hodiny.



Graf č.4: Průměrné směrodatné odchylky vertikální složky v denním chodu

Denní chody z anemometru -Věž mají stejné průběhy, ale o jiných velikostech.



Graf č.5: závislost mezi intenzitou turbulence 2D a směrodatnou odchylkou Z

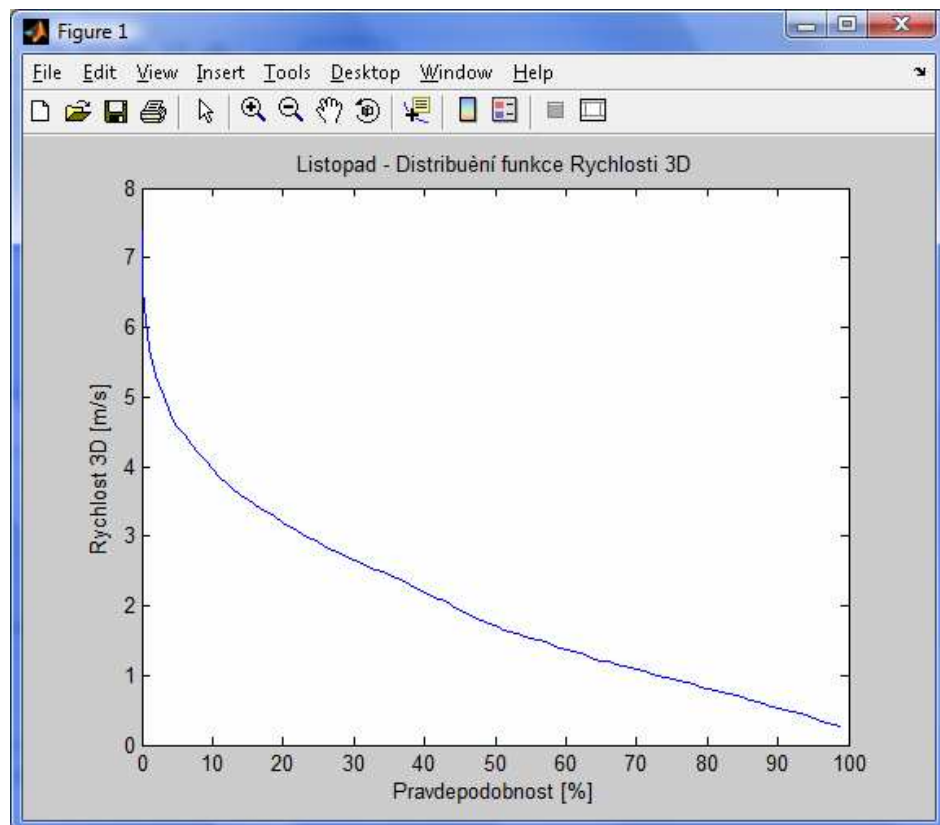
Na grafu č. 5 je zobrazena závislost mezi intenzitou turbulence 2D a SMD Z. Závislost je proložena polynomickou spojnící trendu 2. řádu. Ideálně by spojnice trendu zde měla být lineární, nám vyšla nejpodobněji rovnice 2. řádu.

Pokud se podíváme na denní průběh průměrkované 3D rychlosti větru zjistíme, že průběh je tvarově skoro stejný, jen dosahuje větších hodnot to je způsobeno působení Z složkou. Graf viz příloha. To je způsobeno Z složkou. Graf viz příloha.

To samé se může říct o průběhu průměrkované 3D Intenzitě turbulence, pouze hodnoty dosahují dvojnásobku velikosti 2D. Graf viz příloha.

## 8.2. Distribuční funkce

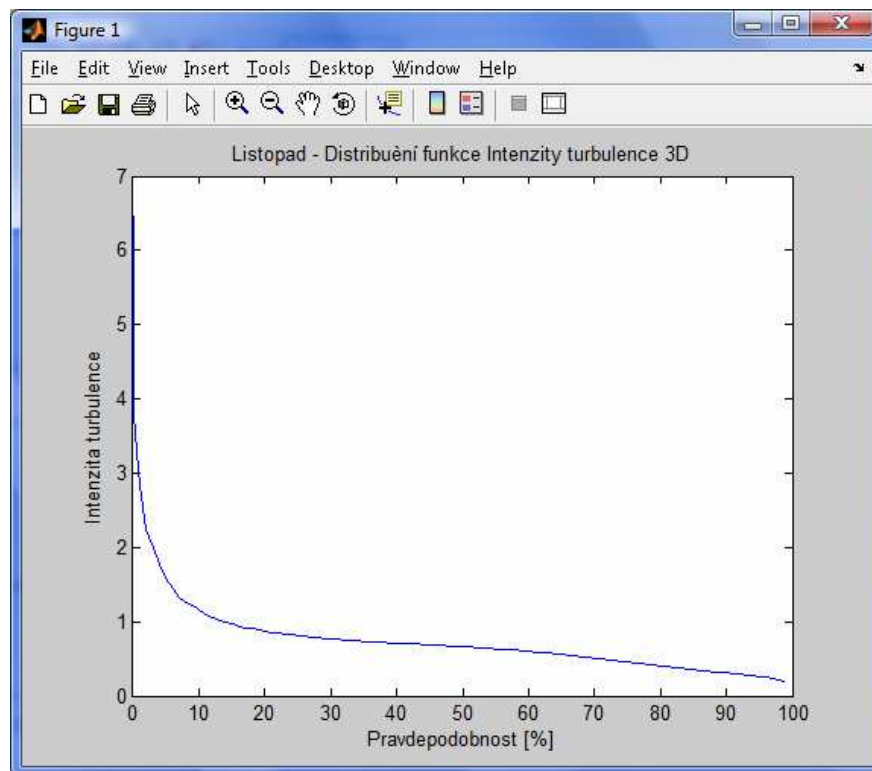
Dále jsem vypočetl distribuční funkci pro 3D rychlost a Intenzitu turbulence na Lampě a Věži. Distribuční funkce je definována jako pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty menší nebo rovné než je daná hodnota.



Graf č.6: Distribuční funkce rychlosti 3D

Tento graf distribuční funkce nám říká s jakou pravděpodobností bude rychlost větru 3D větší nebo rovna než daná hodnota. Z tohoto grafu vyplývá 10% pravděpodobnost že bude foukat okolo 4m/s, v prostředí okolo anemometru-Lampa za měsíc listopad.

Pro ukázkou přidávám i distribuční funkci Intenzity turbulence 3D z anemometru-Lampa za měsíc listopad (Graf. č.7).



Graf č.7: Distribuční funkce intenzity turbulence 3D

V těchto tabulkách jsou data pro zhotovení obrázku, jaká je rychlost a intenzita turbulence na Milešovce v okolí anemometru-Lampa a anemometru-Věž za zkoumané období.

**a) anemometr -Lampa**

	Rychlost 3D				
	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen
Střední hodnota [m/s]:	2,0359	1,5469	1,5060	2,4487	2.1748
Směrodatná odchylka [m/s]:	1,3435	0,9698	1,0220	1,3614	1.3513
Minimální hodnota [m/s]:	0,0434	0,0218	0,0370	0,0998	0.0259
Maximální hod. [m/s]:	7,3700	5,2940	6,1360	7,2880	6.853
Medián [m/s]:	1,7130	1,4290	1,2750	2,3745	2.01

Tab. č.3: hodnoty rychlost 3D anemometr-Lampa

Intenzita turbulence 3D					
	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen
Střední hodnota:	0,7293	0,9256	0,8517	0,8811	0,8735
Směrodatná odchylka:	0,4819	0,8864	0,9909	1,0503	0,8045
Minimální hodnota:	0,1172	0,1071	0,0000	0,1446	0,1700
Maximální hod.:	6,4620	11,5500	12,7600	16,7300	13,7300
Medián:	0,6620	0,8606	0,6225	0,7103	0,7208

Tab. č.4: hodnoty intenzita turbulence 3D anemometr -Lampa

#### b) anemometr-Věž

Rychlost 3D					
	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen
Střední hodnota [m/s]:	9,1151	9,4024	7,2255	8,6368	8,6911
Směrodatná odchylka [m/s]:	3,8499	3,9576	3,2247	3,7046	3,8052
Minimální hodnota [m/s]:	0,1032	0,3858	0,1341	0,2448	0,2638
Maximální hod. [m/s]:	20,2800	24,9400	17,0500	21,5500	22,6800
Medián [m/s]:	9,1050	9,5670	6,8590	8,7171	8,6640

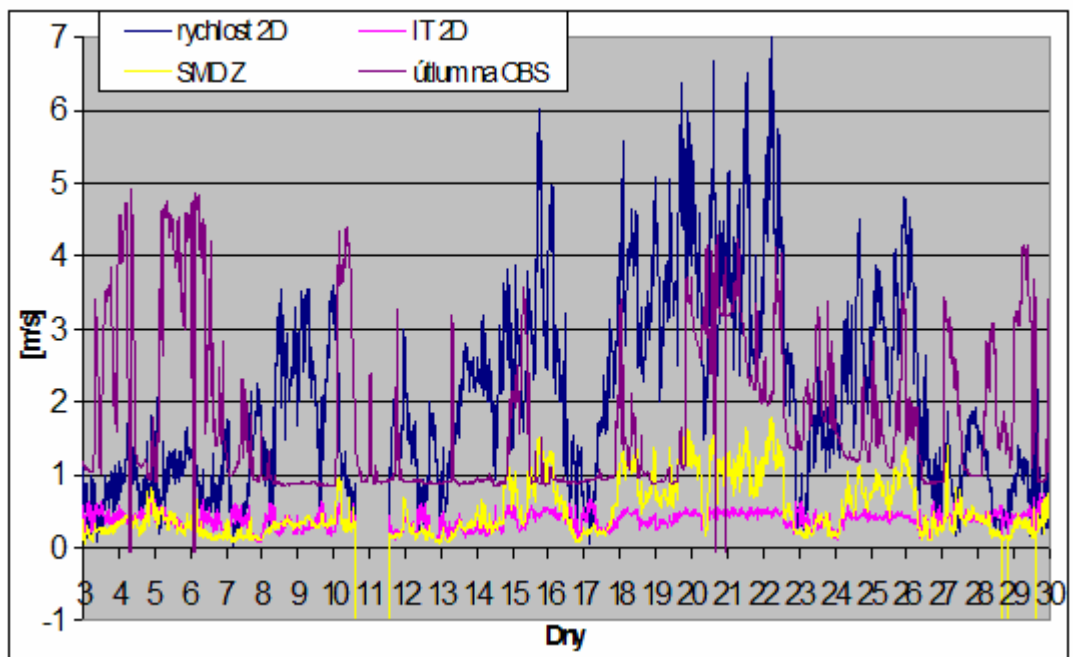
Tab. č.5: hodnoty rychlost 3D anemometr-Věž

Intenzita turbulence 3D					
	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen
Střední hodnota:	0,1887	0,1975	0,2076	0,2410	0,2460
Směrodatná odchylka:	0,1747	0,1288	0,1752	0,2157	0,1410
Minimální hodnota:	0,0281	0,0300	0,0193	0,0000	0,0317
Maximální hod.:	6,1320	1,2760	4,4900	7,9010	2,5370
Medián:	0,1701	0,1744	0,1639	0,2052	0,2204

Tab. č.6: hodnoty intenzita turbulence 3D anemometr-Věž

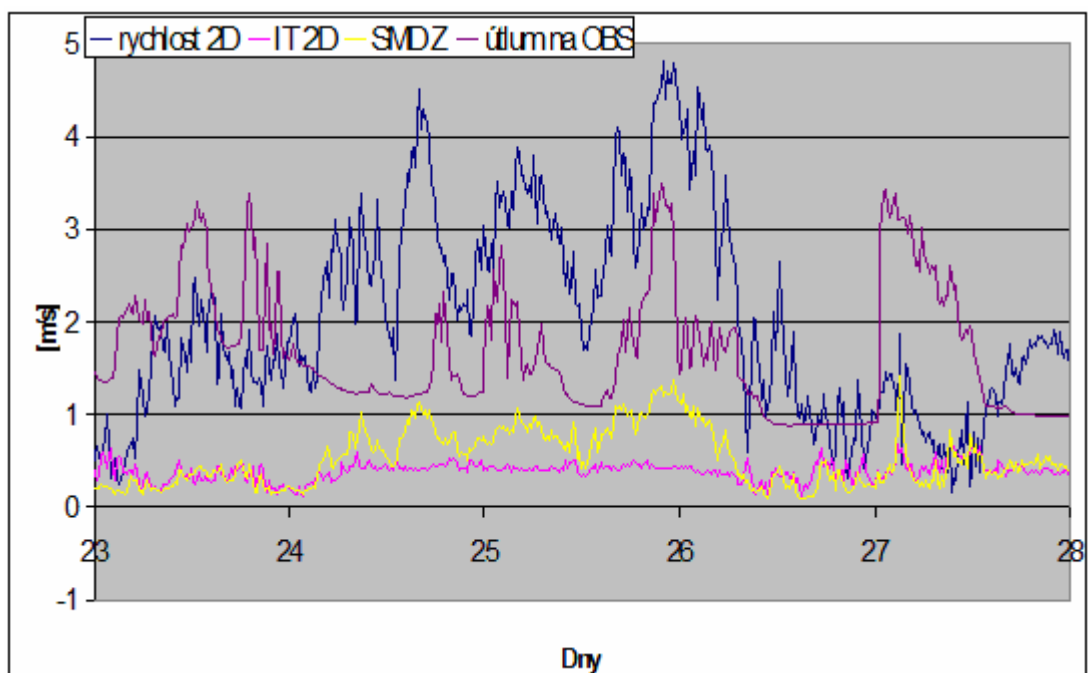
Tyto tabulky nám říkají, že i když jsou oba anemometry na vršku Milešovky, tak parametry jsou rozdílné. Je zde patrné, že vítr jdoucí na anemometr-Lampa je oslaben prostředím. Naproti tomu na anemometr-Věž jde vždy ten nejsilnější vít. Pro OBS, jak už jsme říkal je důležitější anemometr-Lampa. Proto někdy nemusí být výhodnější dávat OBS do závětrí, protože tam je větší intenzita turbulence.

### 8.3. Vliv větru na útlum



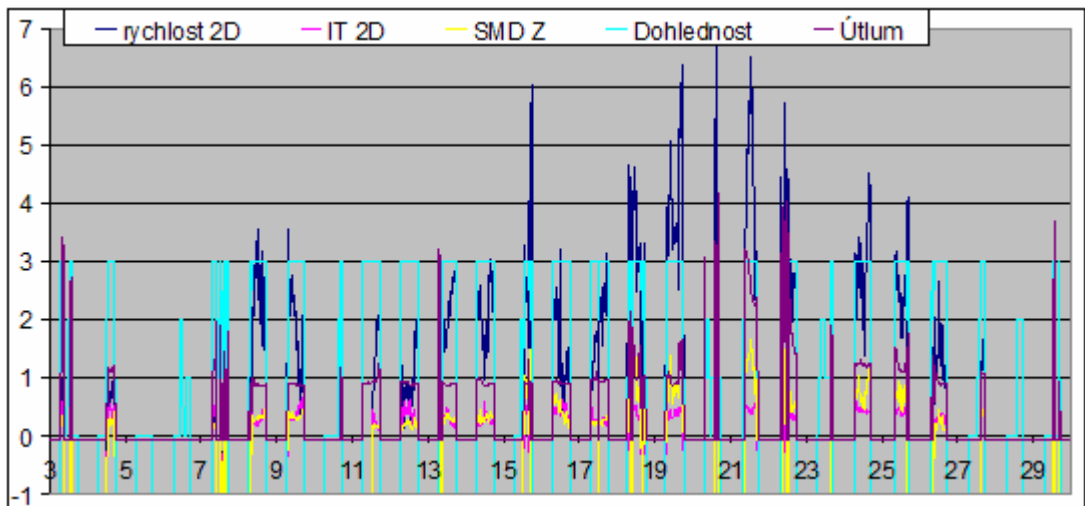
Graf č.8: Průběh rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z a útlumu v listopadu 2008

Zde vidíme (Graf. č.8) měsíční průběhy rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z a útlumu. Hodnoty v záporných číslech znamenají, že se neměřilo nebo byla chyba měření. Z tohoto grafu není moc patrné, jaký mají tyto průběhy vliv na útlum OBS, proto jsem udělal výťah 23.-28. listopadu 2008 (Graf č.9).

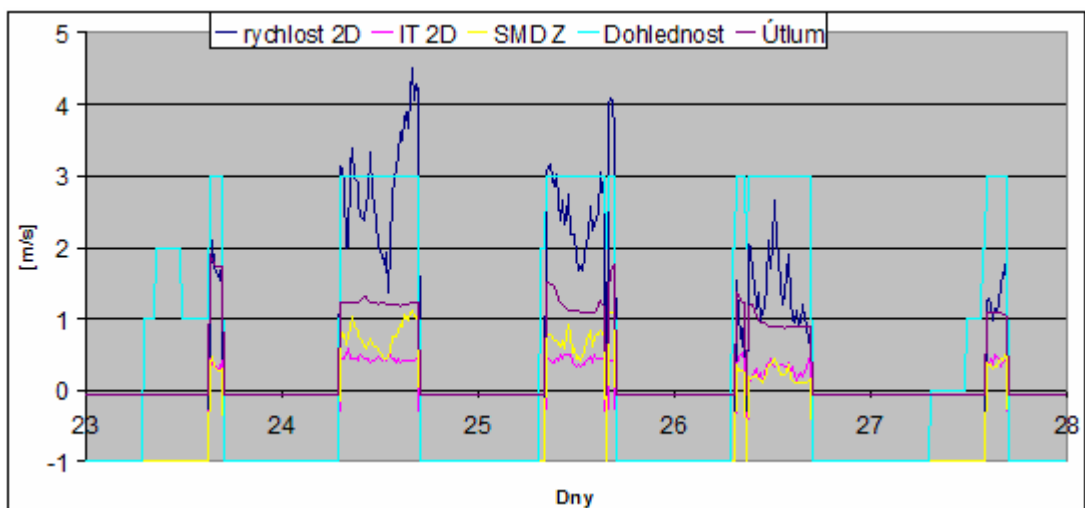


Graf č.9: Průběh rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z a útlumu v 23.-28.listopadu 2008

Můžeme si všimnout, že Intenzita turbulence 2D a SMD Z při malé rychlosti větru se skoro shodují, rozdíl nastane, když rychlost 2D se zvýší. Další důležitým faktorem je, že útlum místy dosahuje takových hodnot, které větrné turbulence nemohly zapříčinit. Proto bylo mým dalším krokem odfiltrout data, která byla ovlivněna jinými událostmi, než větrnými turbulencemi a s nimi společně. Odfiltroval jsem všechna data ovlivněná mlhou, protože je dokázáno, že má veliký vliv na útlum OBS (Graf č.10).



Graf č.10: Průběh rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z, útlumu a dohlednosti v listopadu 2008 bez mlhy



Graf č.11: Průběh rychlosti 2D, IT 2D, SMD Z a útlumu v 23.- 28.listopadu 2008 bez mlhy

Zde je vidět (Graf č.11), že všechny výkyvy útlumu jednoznačně nezpůsobené větrnými turbulencemi (IT) jsou odstraněny. Pořád ale není vidět



ze zkoumaných veličin co má vliv na útlum OBS.

## 8.4. Korelace

Korelační koeficienty níže v tabulkách jsou počítány v Matlabu. Koeficienty jsou vypočteny Spearmanovou metodou, která vypočítává nelineární korelační koeficienty. Všechny níže uvedené veličiny (1-11) jsou korelované s útlumem. Tyto veličiny jsem vybral jako nejzajímavější pro porovnání s útlumem na OBS.

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 1. průměrná 2D rychlost             | 8. SMD T   |
| 2. 2D intenzita turbulence          | 9. SMD M ( M = absolutní hodnota okamžité horizontální rychlosti (miskový anemometr) |
| 3. vertikální turbulentní tok tepla | 10. průměrná 3D rychlost   |
| 4. turbulentní energie              | 11. 3D intenzita turbulence  |
| 5. směrodatná odchylka X(SMD X)     |  |
| 6. SMD Y                            |  |
| 7. SMD Z                            |  |

Lampa		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
listopad	prvku: 697	0.22	0.31	0.30	0.30	0.24	0.34	0.34	-0.18	0.26	0.22	0.33
	prvku:2571	-0.06	0.28	0.25	0.15	0.11	0.20	0.20	-0.14	0.08	-0.06	0.35
prosinec	prvku: 173	0.29	0.55	0.23	0.82	0.75	0.85	0.83	-0.37	0.77	0.29	0.38
	prvku: 979	-0.11	0.39	0.45	0.19	0.14	0.25	0.25	0.11	0.13	-0.11	0.40
leden	prvku:1597	0.02	0.22	0.29	0.22	0.24	0.20	0.26	-0.17	0.20	0.02	0.20
	prvku:2700	0.02	0.20	0.24	0.27	0.28	0.25	0.29	-0.17	0.24	0.02	0.20
únor	prvku:1597	0.11	0.05	0.16	0.13	0.17	0.10	0.14	0.12	0.20	0.02	0.20
	prvku: 891	-0.04	0.07	0.10	0.05	0.10	0.00	0.07	0.00	0.01	-0.04	0.07
březen	prvku:1623	0.28	0.04	0.18	0.28	0.26	0.30	0.26	-0.06	0.30	0.28	-0.01
	prvku:2665	-0.15	-0.05	-0.09	-0.15	-0.17	-0.13	-0.15	0.02	-0.15	-0.15	0.01
5 měsíční průměr	bez mlhy	0.18	0.23	0.23	0.35	0.33	0.36	0.37	-0.13	0.35	0.17	0.22
5 měsíční průměr	s mlhou	-0.07	0.18	0.19	0.10	0.09	0.11	0.13	-0.04	0.06	-0.07	0.21

(Tab. č. 7) Tabulka korelační koeficientu z anemometru - Lampa

Věž		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
listopad	prvku: 728	0.10	0.13	-0.15	0.18	0.12	0.27	0.08	-0.22	0.21	0.08	0.09
s mlhou	prvku:2657	0.11	0.19	0.06	0.22	0.17	0.26	0.17	-0.04	0.23	0.09	0.17
prosinec	prvku: 190	0.05	0.59	-0.11	0.54	0.39	0.66	0.34	-0.41	0.59	0.02	0.56
s mlhou	prvku:1470	0.24	0.16	0.20	0.22	0.17	0.30	0.11	0.04	0.26	0.21	0.14
leden	prvku:1271	0.09	0.21	0.17	0.31	0.37	0.24	0.26	-0.02	0.32	0.08	0.20
s mlhou	prvku:2219	0.19	0.16	0.13	0.33	0.40	0.24	0.27	0.01	0.34	0.19	0.14
únor	prvku: 789	-0.17	0.26	0.18	0.19	0.22	0.16	0.15	0.09	0.17	-0.17	0.27
s mlhou	prvku:1637	-0.16	0.11	0.12	-0.01	0.00	-0.04	-0.03	-0.02	-0.03	-0.16	0.13
březen	prvku:1711	0.25	-0.01	-0.18	0.21	0.14	0.24	0.24	0.03	0.22	0.25	-0.04
s mlhou	prvku:2813	0.03	-0.18	-0.10	-0.10	-0.15	-0.06	-0.07	-0.18	-0.10	0.02	-0.18
5 měsíční průměr	bez mlhy	0.06	0.24	-0.02	0.29	0.25	0.31	0.21	-0.11	0.30	0.05	0.22
5 měsíční průměr	s mlhou	0.08	0.09	0.08	0.13	0.12	0.14	0.09	-0.04	0.14	0.07	0.08

(Tab. č. 8) Tabulka korelační koeficientu z anemometru -Věž

Z těchto tabulek (Tab. č. 2, 3.) vidíme několik zajímavých vlastností. Je tu potvrzené:

1. Anemometr-Lampa lépe koreluje s útlumem OBS to znamená, že na OBS má větší vliv klimatické podmínky u něj než u anemometr-Věž.
2. Korelace bez mlhy vycházejí lépe než s mlhou. Zanedbání dat ovlivněné mlhou bylo správné.

Většina korelací vycházejí do 0,4 občas tuto hodnotu přesáhne, ale to je ovlivněno malým počtem korelovaných hodnot. Z toho můžeme usoudit, že žádná veličina nemá jednoznačný vliv na OBS. Je zde patrné:

- rychlost 2D a 3D mají u anemometru-Lampa a u anemometru-Věž mají nulový význam
- to samé se dá říci o vertikální turbulentní tok tepla, jako o rychlosti
- intenzita turbulence 2D a 3D je u obou anemometru stejné, ale průměrná korelace 0,23 je slabá
- SMD sonické teploty nemá žádný vliv na útlum
- SMD X,Y,Z a M mají korelaci okolo 0,3 což je malé ale mají ji stálou tyto korelace byly nejsilnější

## 9. Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval vlivem větrných turbulencí na fluktuaci radiokomunikačního signálu.

Bylo nutné, abych se seznámil s vlastnostmi a pravidly celkového chování větru, abych byl schopen rozpoznat vliv větrných turbulencí na optický bezdrátový spoj.

Na základě výsledků z anemometrických dat mohu konstatovat že výběr pracovního stanoviště pro moji práci byl správný. Vítr zde dosahoval až 25 m/s (90km/h). V okolí daného spoje je vysoký porost vegetace, která je zdrojem větrných turbulencí.

Jako nevýhodu mé práce bych označil dobu měření (listopad až březen), jelikož v zimním období je nejdrsnější podnebí na Milešovce a tím dochází ke zhoršení zjištělosti vlivu větru na útlum OBS, jelikož se přidávají další faktory jako námraza, mlhy apod.

V mé práci jsem zmapoval větrné podmínky na Milešovce za stanovené období a tím jsme si potvrdili jejich vlastnosti.

Ze zjištěných výsledků je patrné, že větrné turbulence nemají přílišný vliv

na OBS. Ukazuje se, že na útlum nemá vliv absolutní velikost větru, ale jeho velikost změny, avšak k žádným konkrétním výsledkům jsem nedošel, jelikož získaná data se velmi lišila měsíc od měsíce. Bohužel se danou problematikou u nás v České republice zabývám jako první, tudíž nemám možnost srovnání s jinými pozorováními.

## Seznam použité literatury:

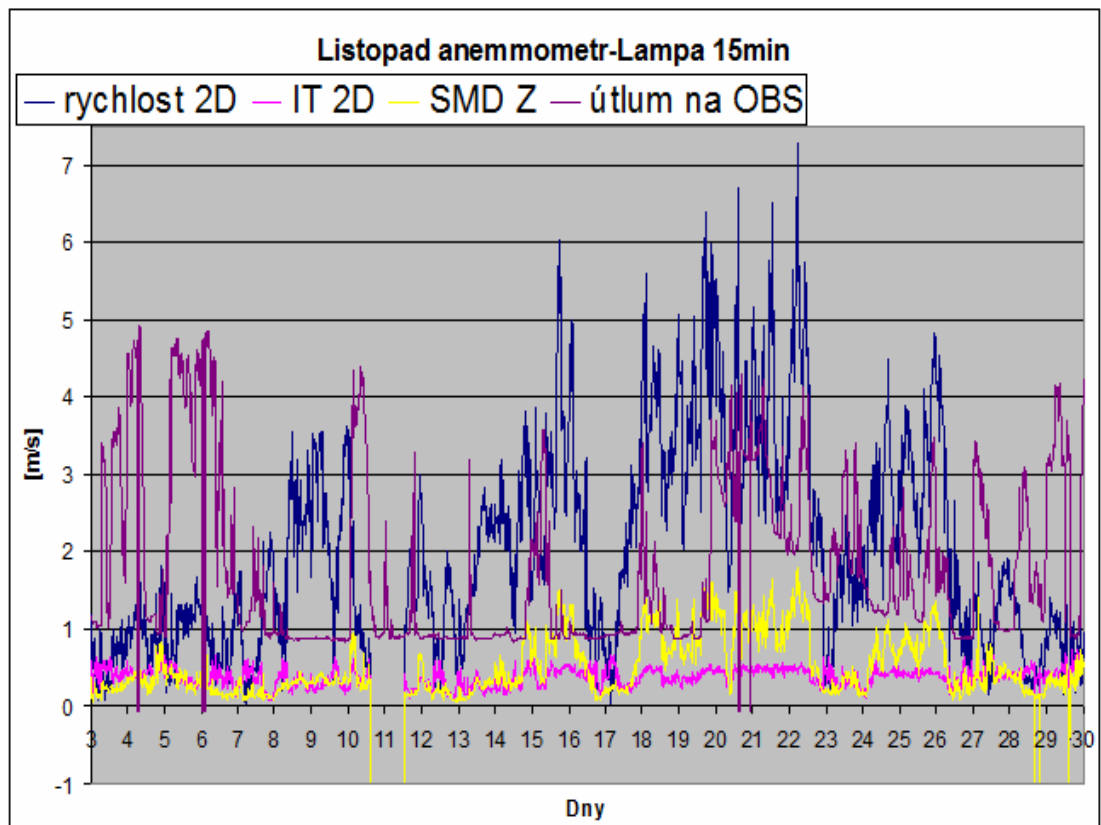
- 1) Bendnář, J., Zikmunda, O.: *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. Praha, Academia 1985. ISBN 21-070-85
- 2) KOLKA Z., WILFERT O., FIŠER O.: *Achievable qualitative parameters of optical wireless links*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2007, Roč. 9, č. 8, s. 2419-2423. ISSN 1454-4164.
- 3) PROKES, A.: *Modeling of Atmospheric Turbulence Effect on Terrsrial FSO Link* [online]. 2009 [cit. 2009-02-12] Dostupný z WWW: <[http://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09\\_01\\_042\\_047.pdf](http://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09_01_042_047.pdf) >
- 4) Sobíšek, Bořivoj.: *Rychlost a směr větru na území České republiky v období 1961-1990*. Praha, Český hydrometeorologický ústav 2000, ISBN 80-85813-79-3
- 5) Štěkl, J.: *Větrná energie. Meteorologie ve větrné enrgetice*, 1997, Roč. 4, č. 1, ISSN 1211-0531
- 6) UNIS COMPUTERS: *FSO - optika bez kabelů* [online]. 2008 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <[http://www.uniscomp.cz/free-space-optics/page.php?def=hi\\_technology&idmenu=63&idtext=46](http://www.uniscomp.cz/free-space-optics/page.php?def=hi_technology&idmenu=63&idtext=46)>.
- 7) WILFERT, O., KOLKA, Z., BIOLKOVA, V., KŘIVÁK, P., DORDOVÁ, L., FIŠER, O., NĚMEČEK, J.: *Dual optical wireless test link*. Proceedings of the SPIE, Volume 7091 (Free-Space Laser Communications VIII), pp. 70910W-70910W-8 (2008).
- 8) WILFERT, O., KOLKA, Z.: *Optické (laserové) bezdrátové sítě* [online]. 2009 [cit.2009-04-10]. Dostupný z WWW: <[http://www.urel.feec.vutbr.cz/web\\_pages/projekty/clanky/Wilfert\\_Kolka\\_opticke\\_spoje.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Wilfert_Kolka_opticke_spoje.pdf) >.
- 9) Wikipedie.: *Snellův zákon* [online]. 2009 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%AFv\\_z%C3%A1kon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%AFv_z%C3%A1kon)>
- 10) Wikipedie.: *Laminární proudění* [online]. 2009 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1rn%C3%AD\\_proud%C4%9Bn%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1rn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD)>
- 11) Wikipedie.: *Potenciálové proudění* [online]. 2009 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Potenci%C3%A1lov%C3%A9\\_proud%C4%9Bn%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Potenci%C3%A1lov%C3%A9_proud%C4%9Bn%C3%AD)>

## **Seznam přílohy:**

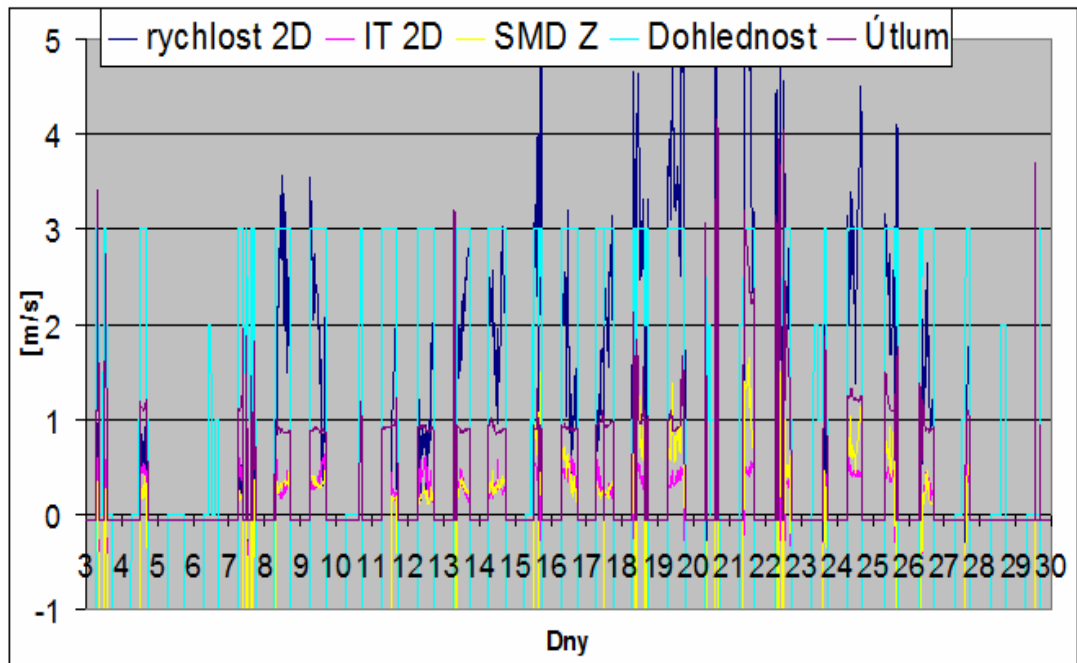
- Příloha A listopad anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha B listopad anemometr-Lampa bez mlhy průměrované po 15 min
- Příloha C prosinec anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha D prosinec anemometr-Lampa bez mlhy
- Příloha E leden anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha F leden anemometr-Lampa bez mlhy průměrované po 15 min
- Příloha G únor anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha H únor anemometr-Lampa bez mlhy průměrované po 15 min
- Příloha I březen anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha J březen anemometr-Lampa bez mlhy průměrované po 15 min
- Příloha K listopad anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha L prosinec anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha M leden anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha N únor anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha O březen anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min
- Příloha P Distribuční funkce rychlosti 3D za Listopad anemometr-Lampa
- Příloha Q Distribuční funkce rychlosti 3D za Prosinec anemometr-Lampa
- Příloha R Distribuční funkce rychlosti 3D za Leden anemometr-Lampa
- Příloha S Distribuční funkce rychlosti 3D za Únor anemometr-Lampa
- Příloha T Distribuční funkce rychlosti 3D za Březen anemometr-Lampa
- Příloha U Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Listopad anemometr-Lampa
- Příloha V Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Prosinec anemometr-Lampa
- Příloha W Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Leden anemometr-Lampa
- Příloha X Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Únot anemometr-Lampa
- Příloha Y Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Březen anemometr-Lampa
- Příloha Z Distribuční funkce rychlosti 3D za Listopad anemometr-Věž
- Příloha AA Distribuční funkce rychlosti 3D za Prosinec anemometr-Věž
- Příloha AB Distribuční funkce rychlosti 3D za Leden anemometr-Věž
- Příloha AC Distribuční funkce rychlosti 3D za Únor anemometr-Věž
- Příloha AD Distribuční funkce rychlosti 3D za Březen anemometr-Věž

Příloha AE Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Listopad anemometr-Věž  
Příloha AF Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Prosinec anemometr-Věž  
Příloha AG Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Leden anemometr-Věž  
Příloha AH Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Únor anemometr-Věž  
Příloha AI Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Březen anemometr-Věž  
Příloha AJ Průměrná rychlost 3D v denním chodu anemometr-Lampa  
Příloha AK Průměrná intenzita turbulence 3D v denním chodu anemometr-Lampa  
Příloha AL Průměrná rychlost 2D v denním chodu anemometr-Věž  
Příloha AM Průměrná intenzita turbulence 2D v denním chodu anemometr-Věž  
Příloha AN Průměrná směrodatná odchylka vertikální složky Z v denním chodu  
anemometr-Věž  
Příloha AO Průměrná rychlost 3D v denním chodu anemometr-Věž  
Příloha AP Průměrná intenzita turbulence 3D v denním chodu anemometr-Věž  
Příloha AQ závislost mezi intenzitou turbulence 2D a směrodatnou odchylkou  
Z z anemometru-Věž

**Příloha:**

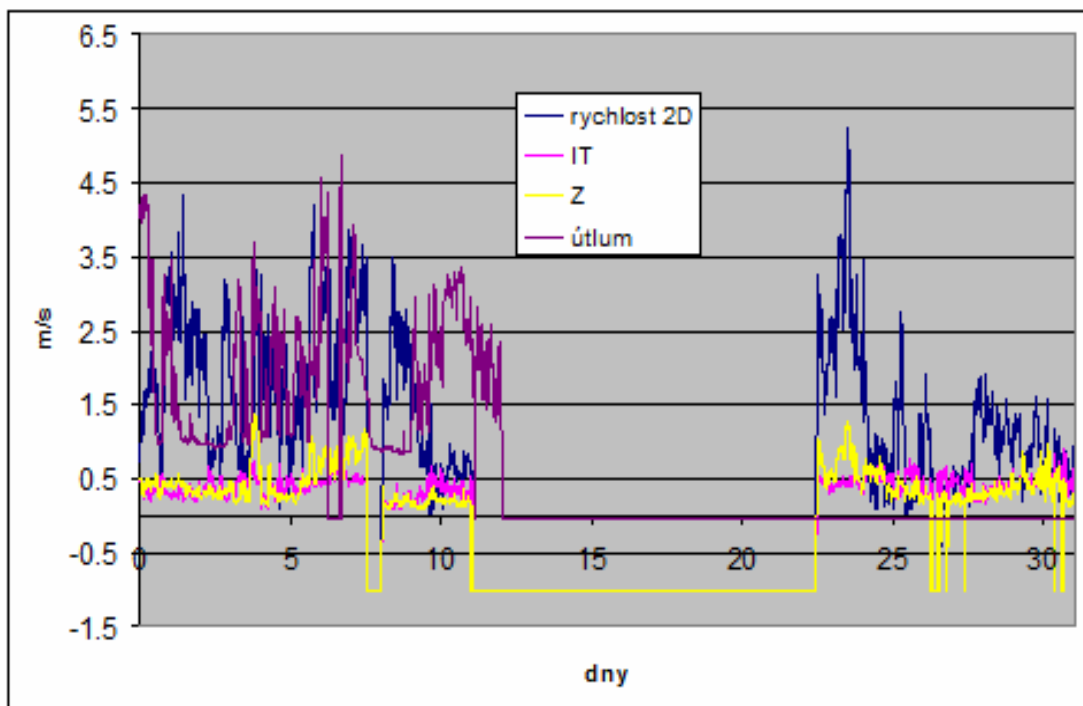


Příloha A listopad anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min

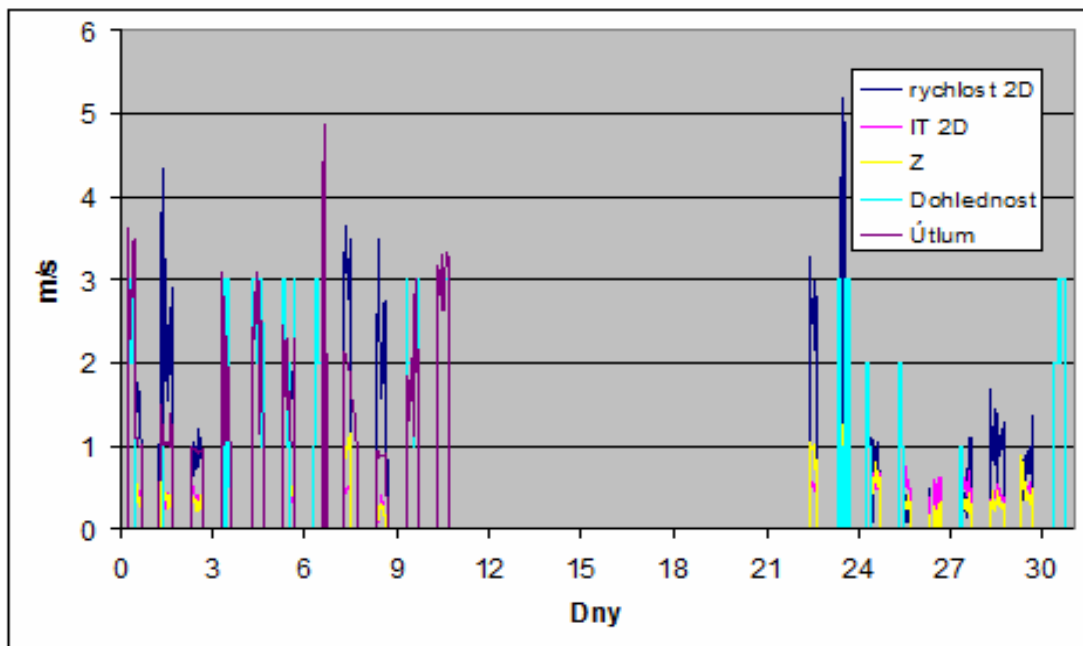


Příloha B listopad anemometr-Lampa bez mlhy průměrované po 15 min

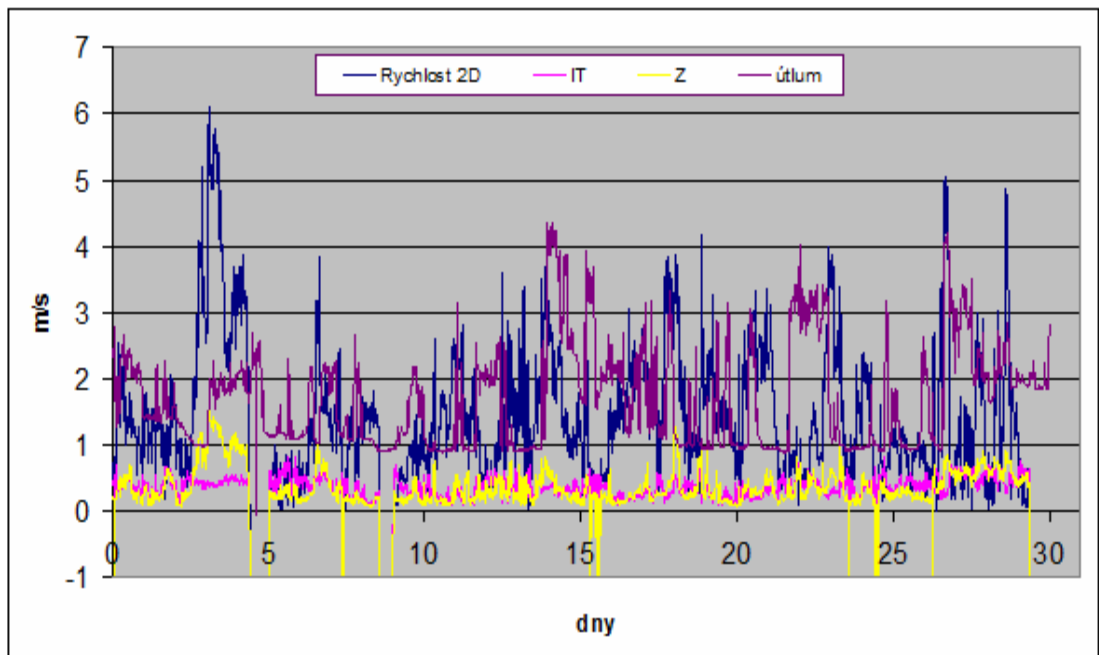




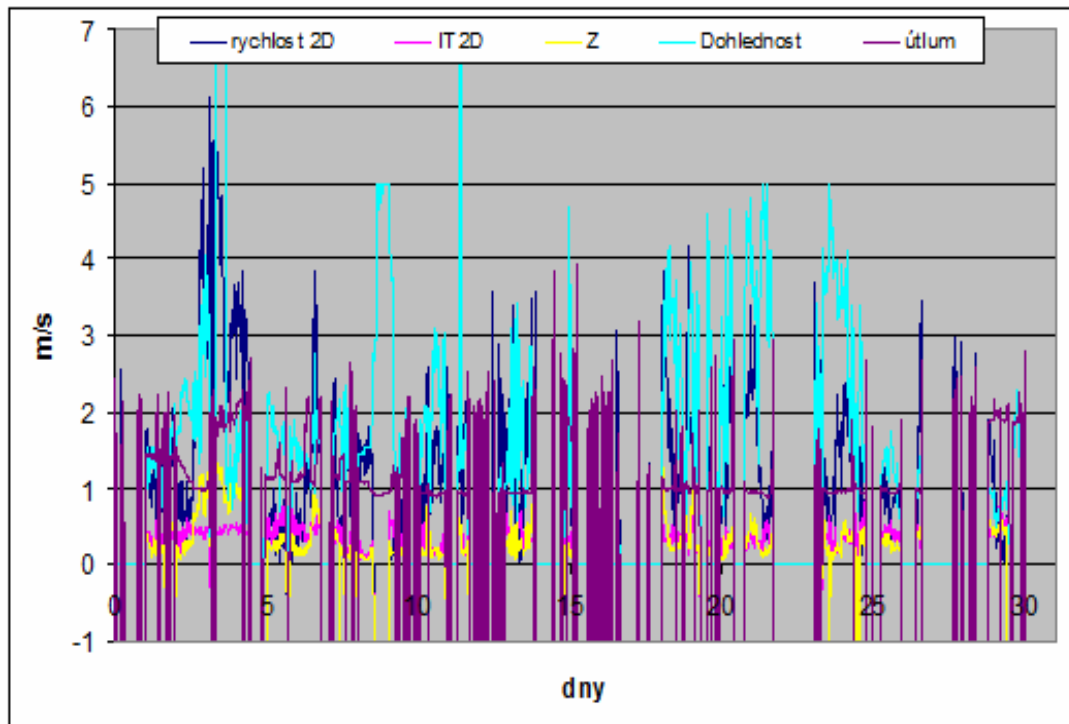
Příloha C prosinec anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min



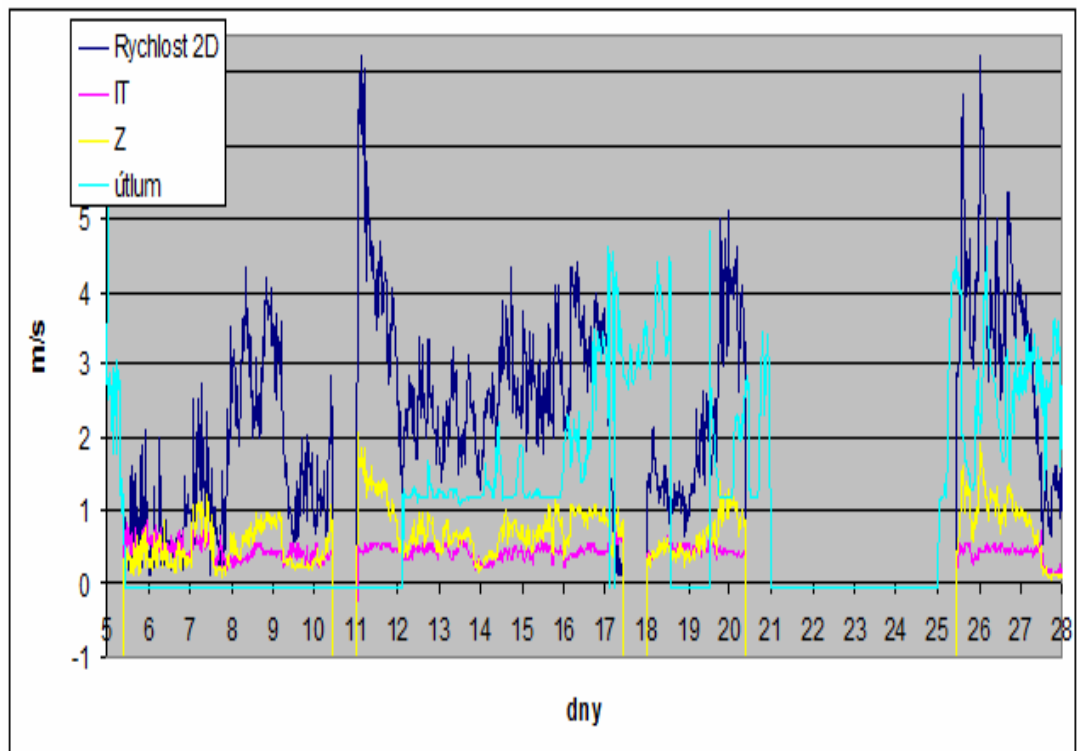
Příloha D prosinec anemometr-Lampa bez mlhy



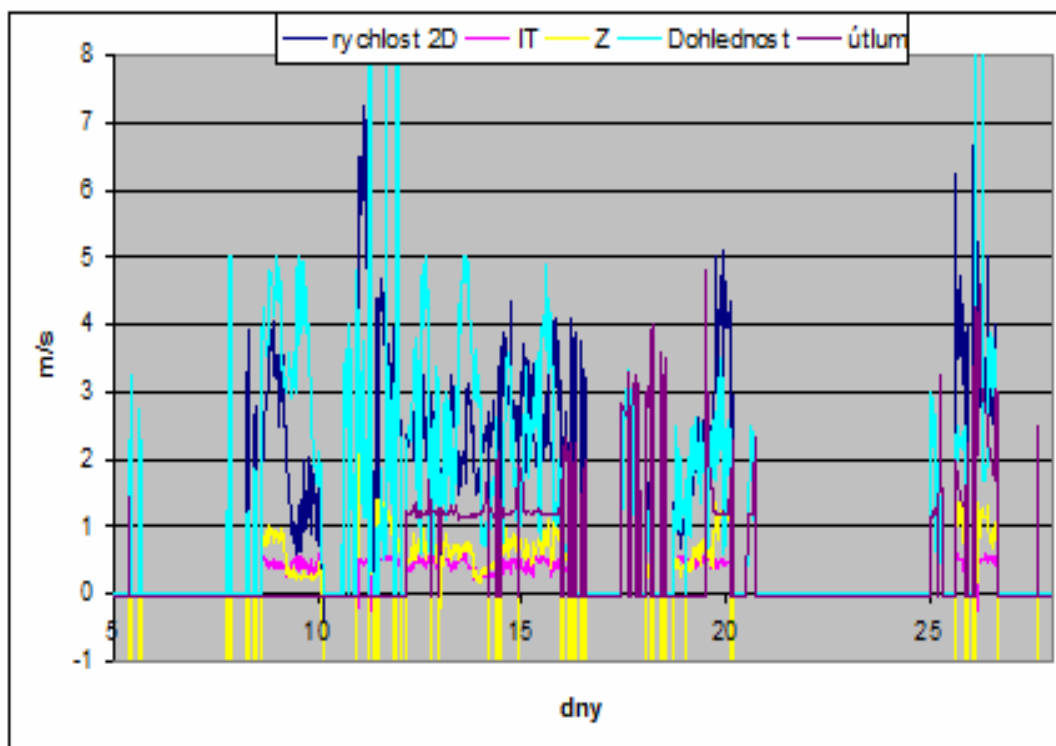
Příloha E leden anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min



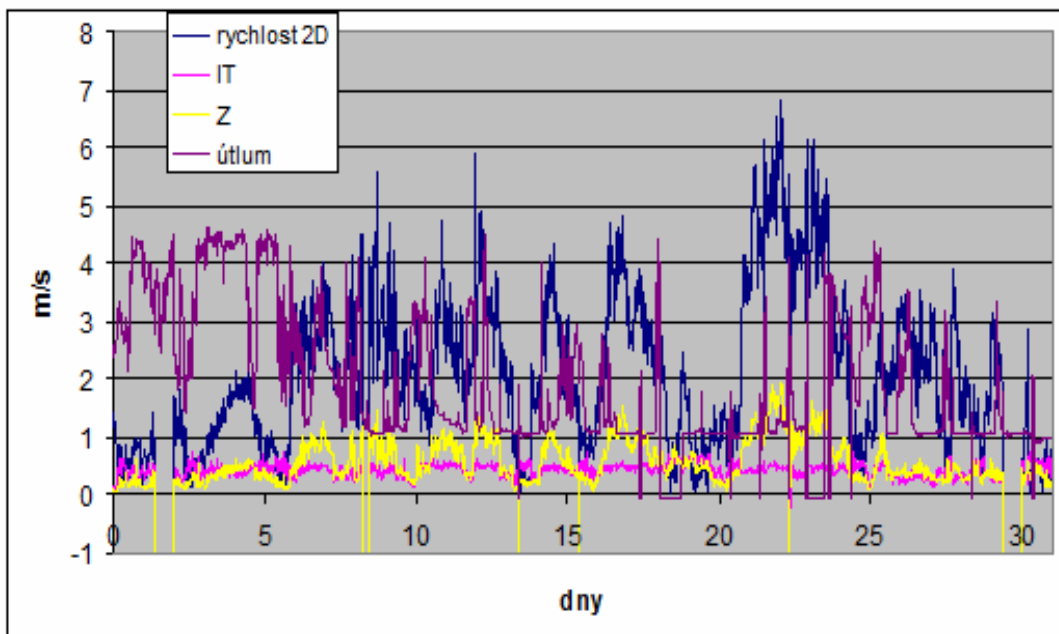
Příloha F leden anemometr-Lampa bez mlhy průměrované po 15 min



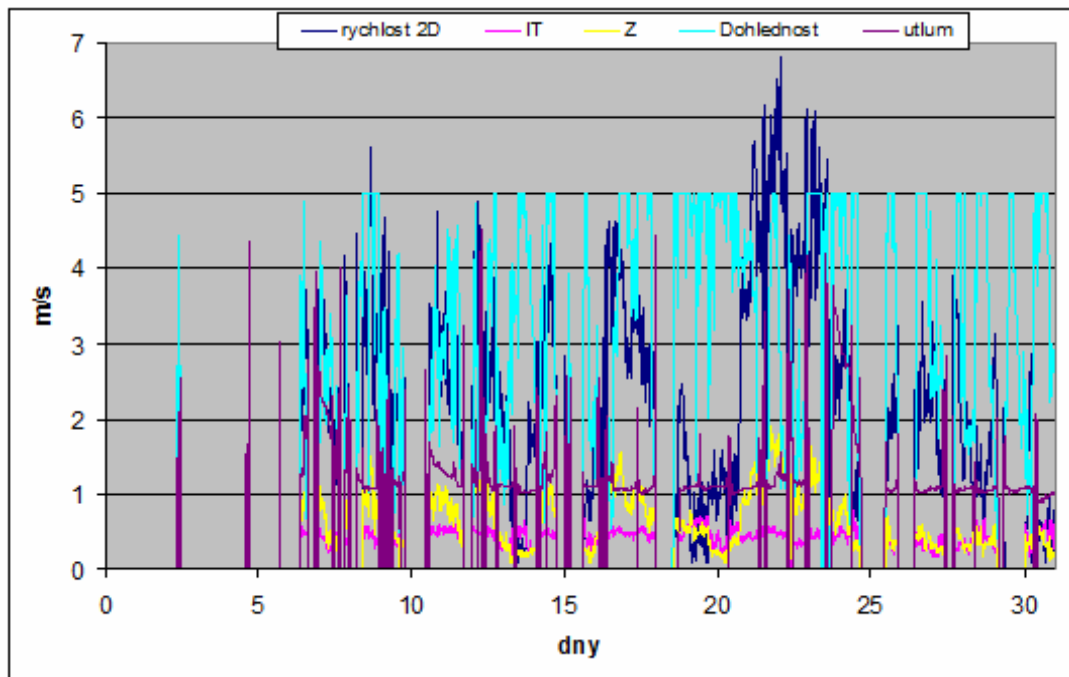
Příloha G únor anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min



Příloha H únor anemometr-Lampa bez mlhy průměrované po 15 min

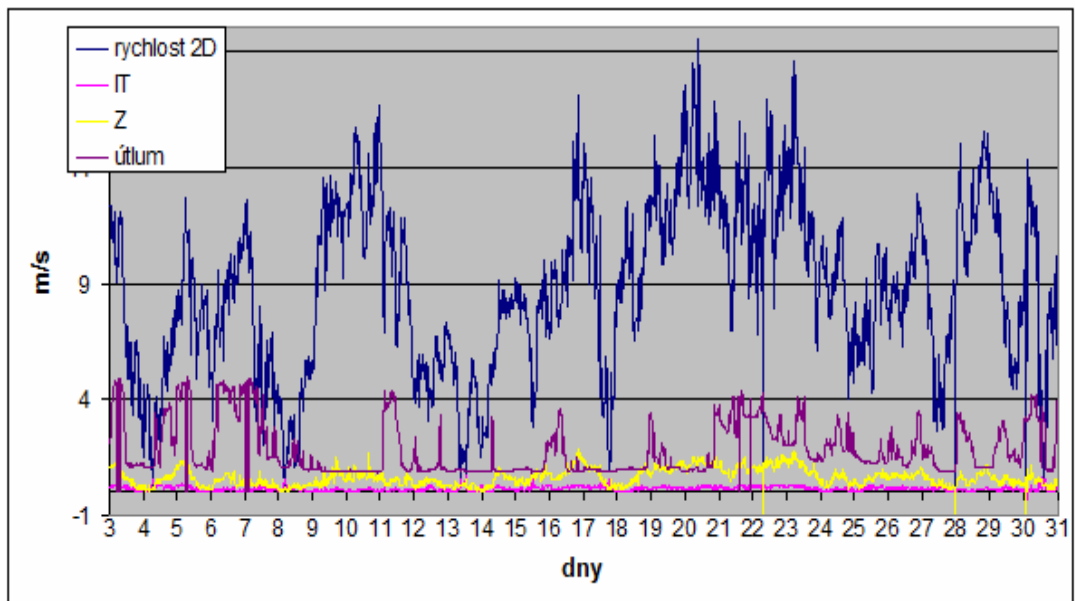


Příloha I březem anemometr-Lampa s mlhou průměrované po 15 min

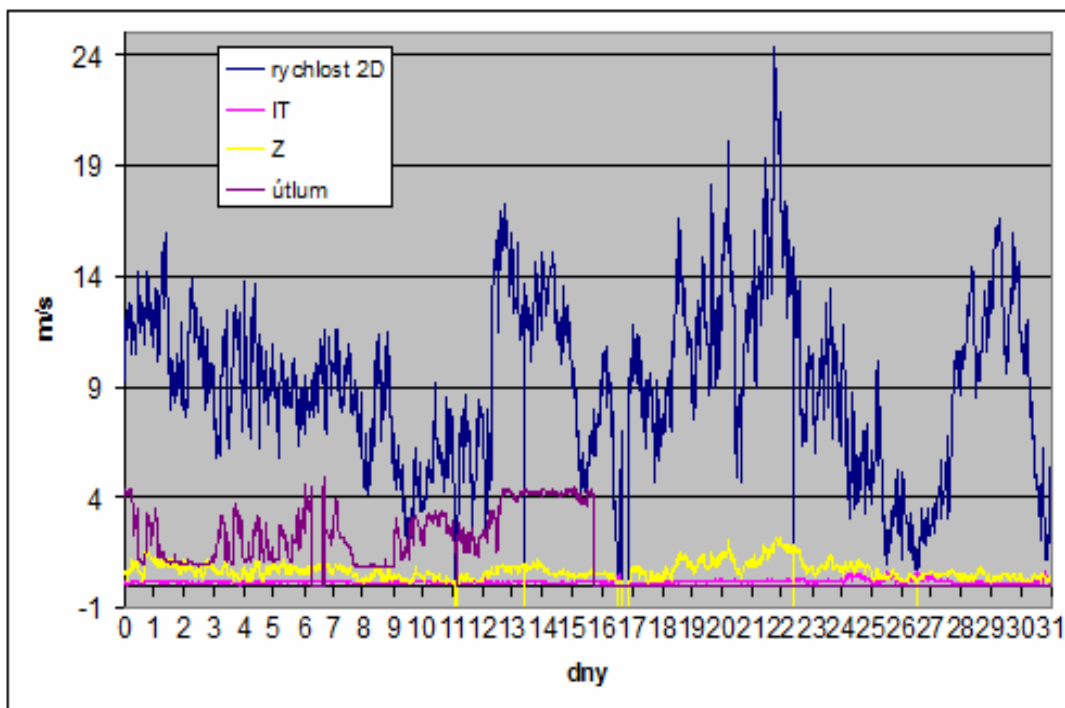


Příloha J březen anemometr-Lampa bez mlhy průměrované po 15 min

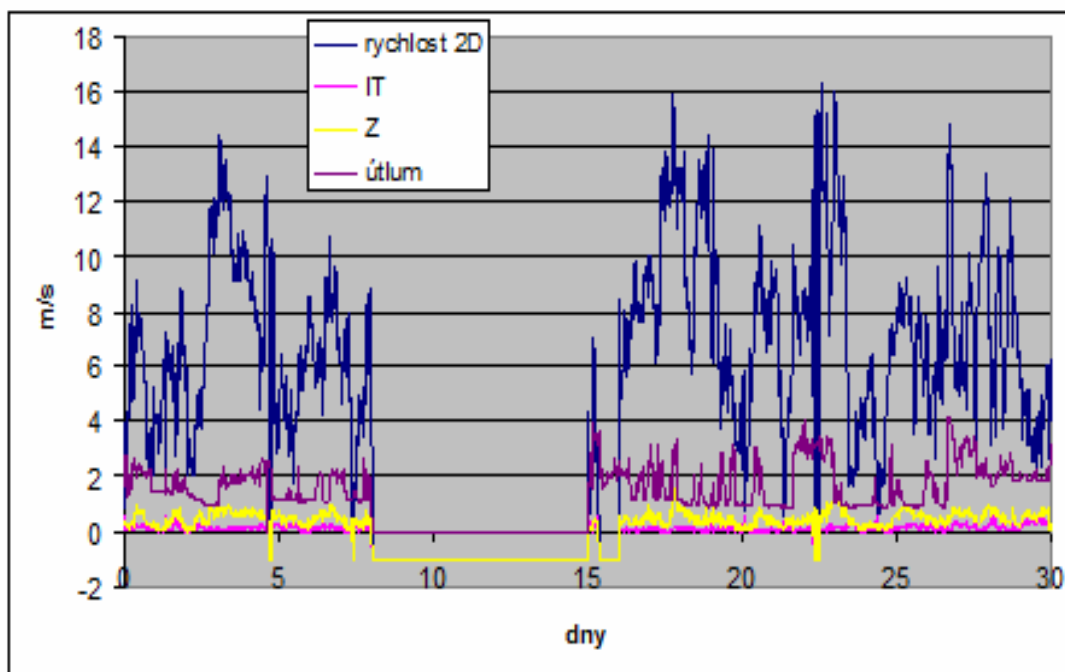




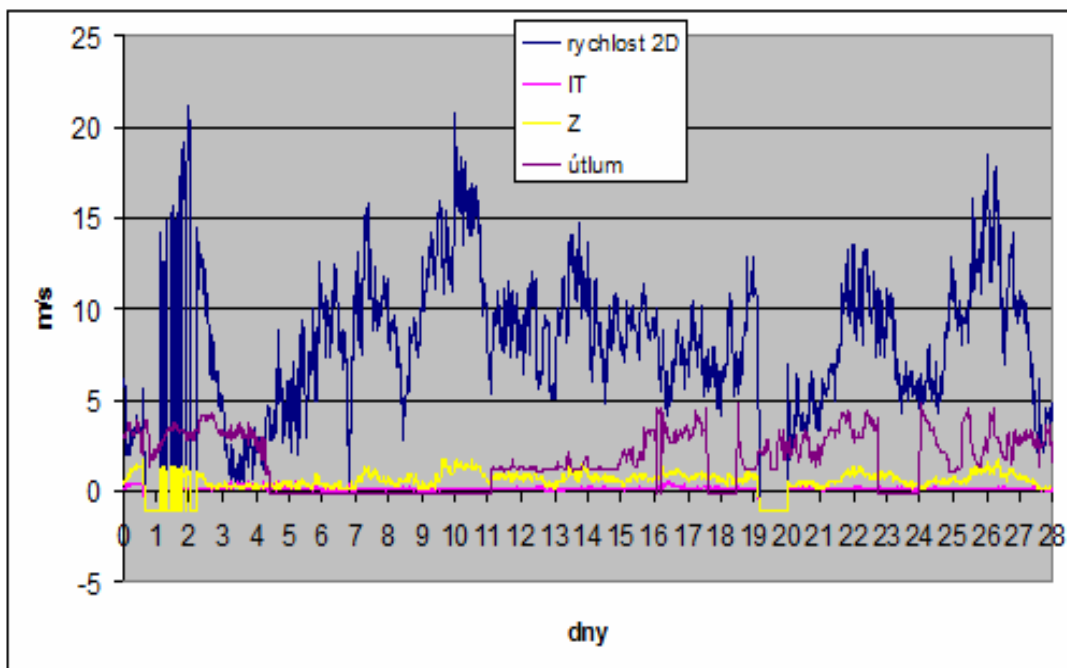
Příloha K listopad anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min



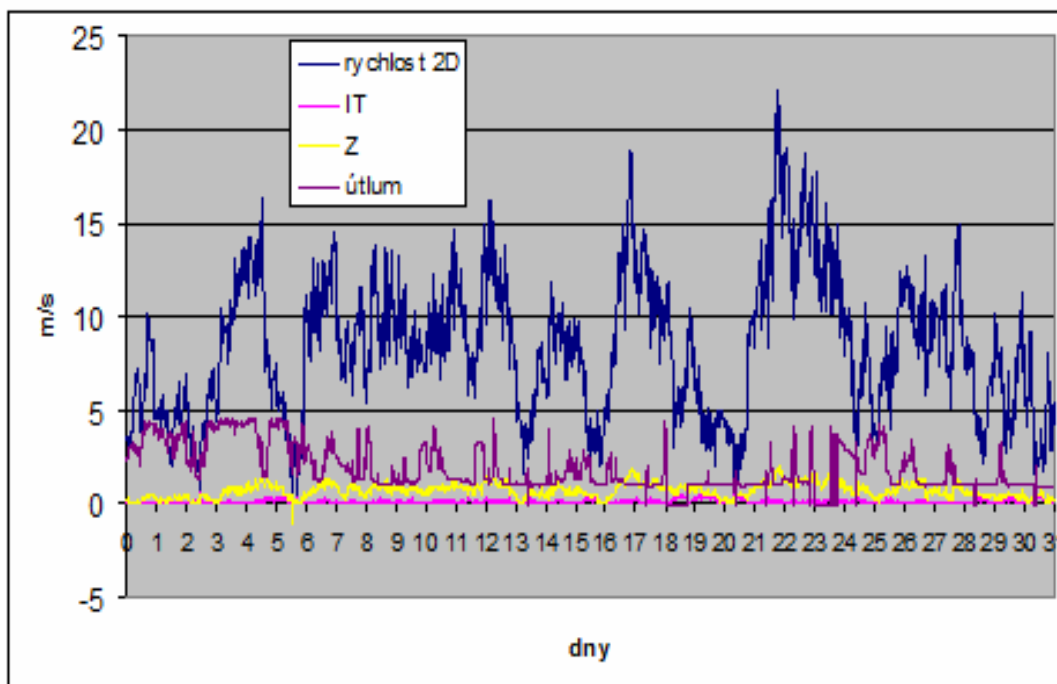
Příloha L prosinec anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min



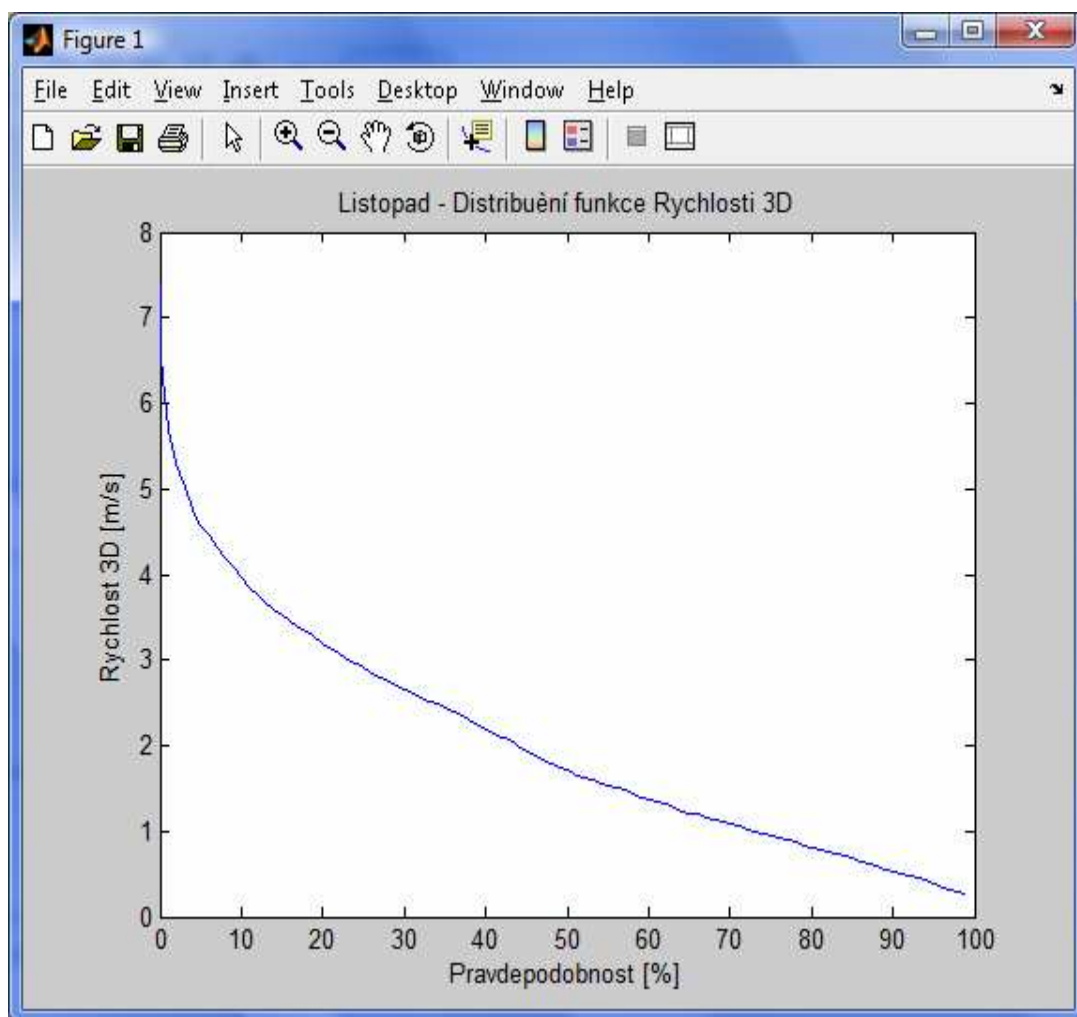
Příloha M leden anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min



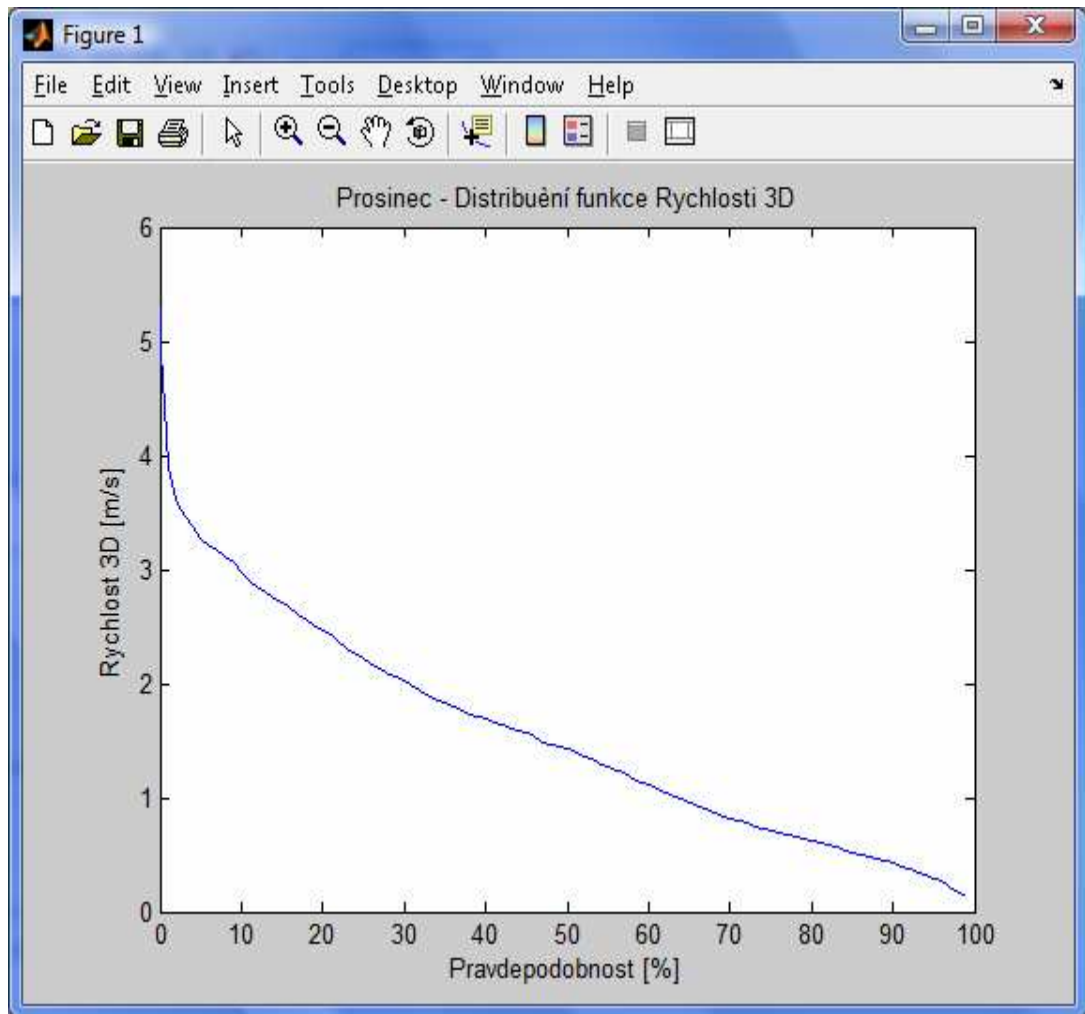
Příloha N únor anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min



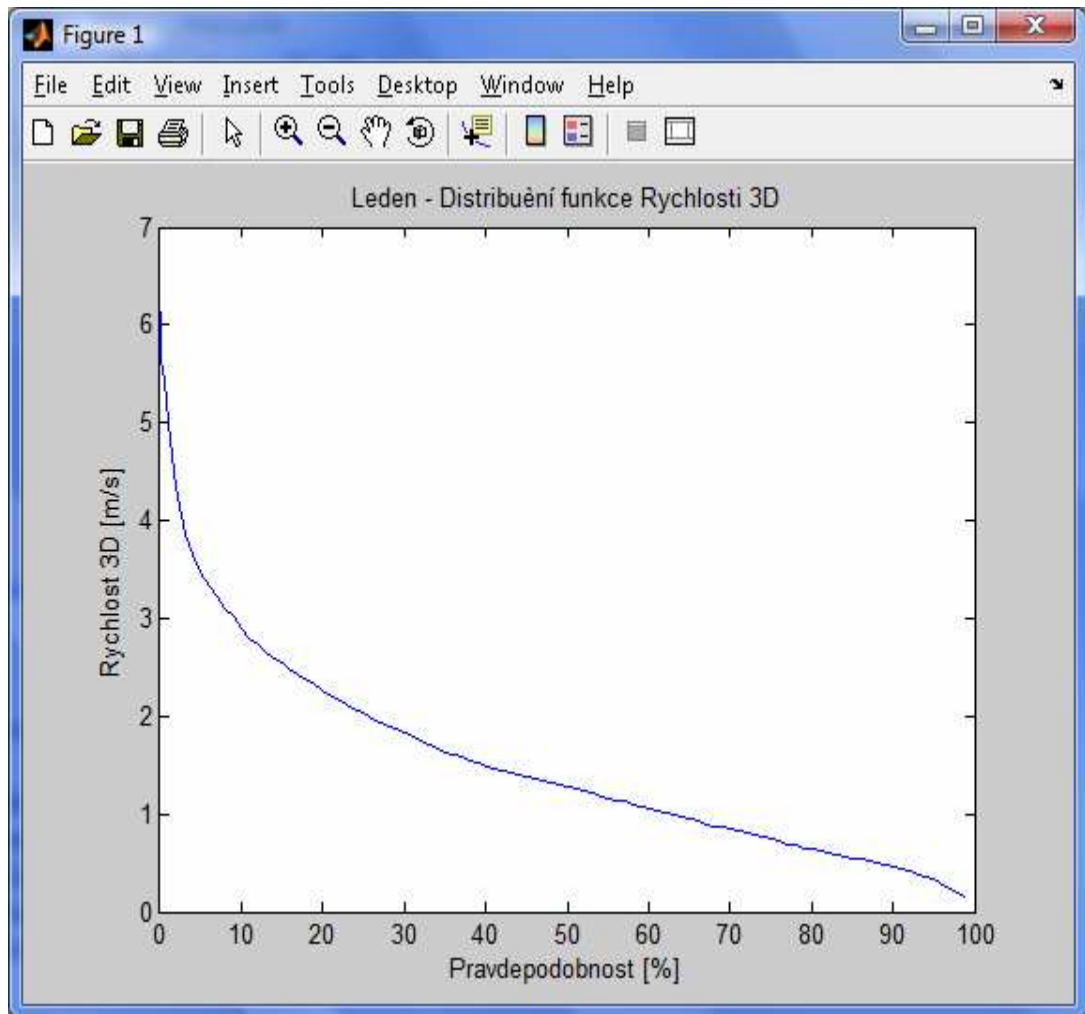
Příloha O březen anemometr-Věž s mlhou průměrované po 15 min



Příloha P Distribuční funkce rychlosti 3D za Listopad anemometr-Lampa

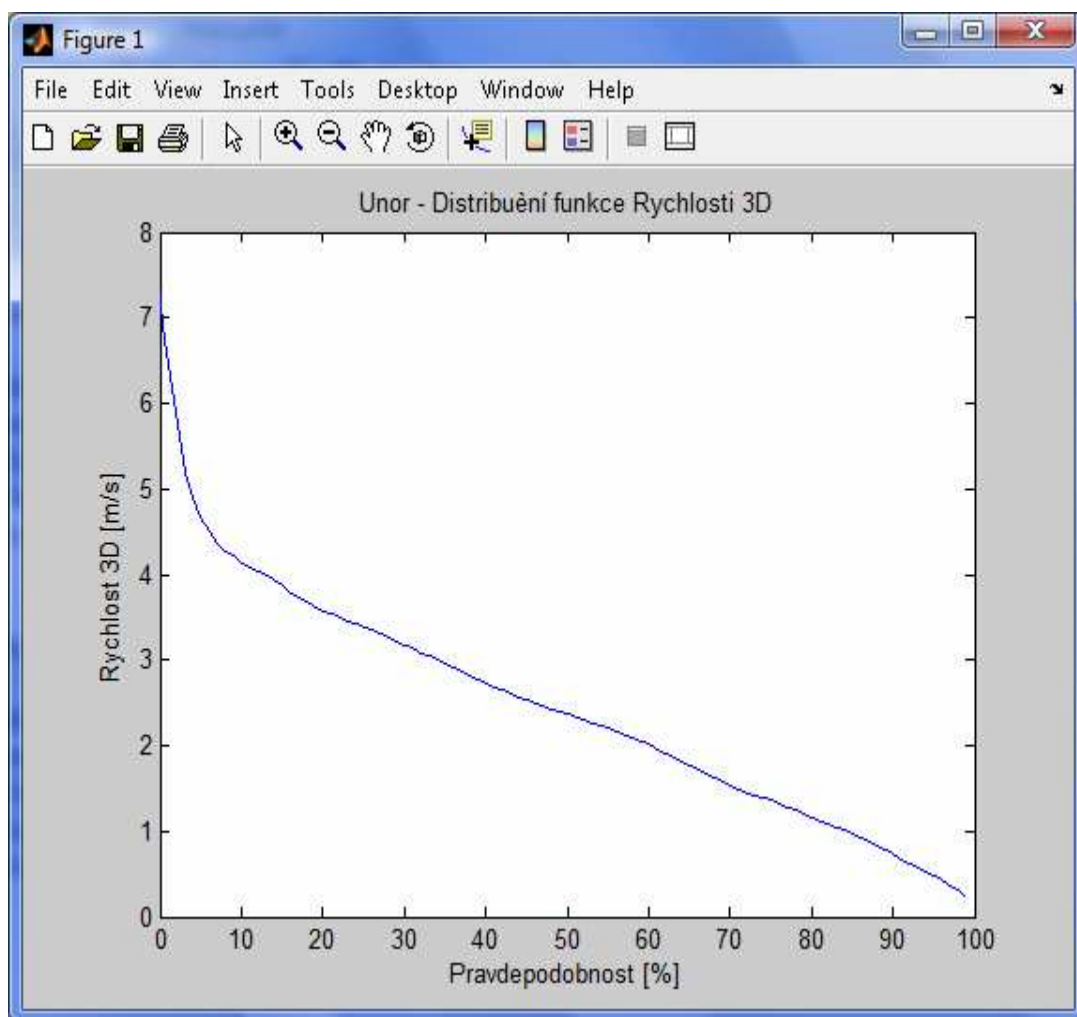


Příloha Q Distribuční funkce rychlosti 3D za Prosinec anemometr-Lampa

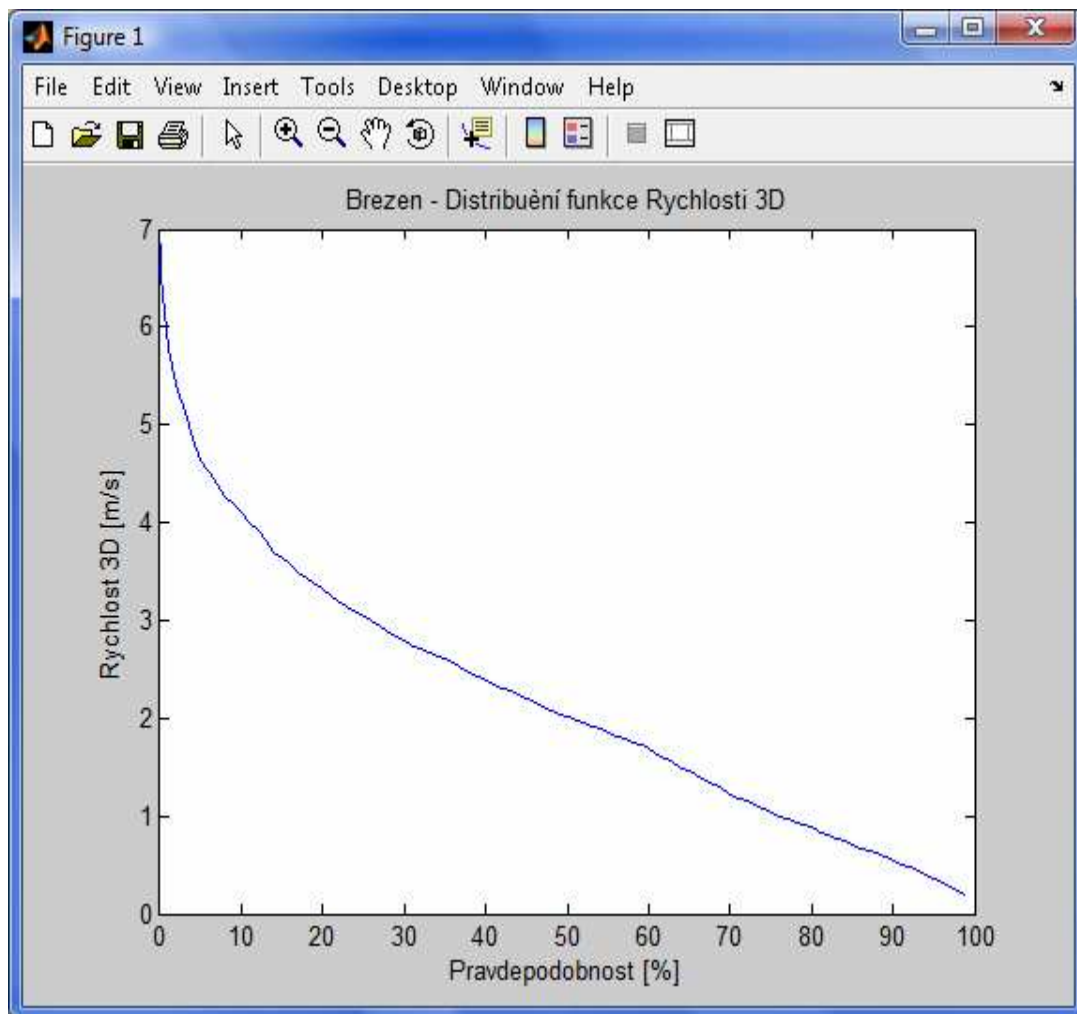


Příloha R Distribuční funkce rychlosti 3D za Leden anemometr-Lampa

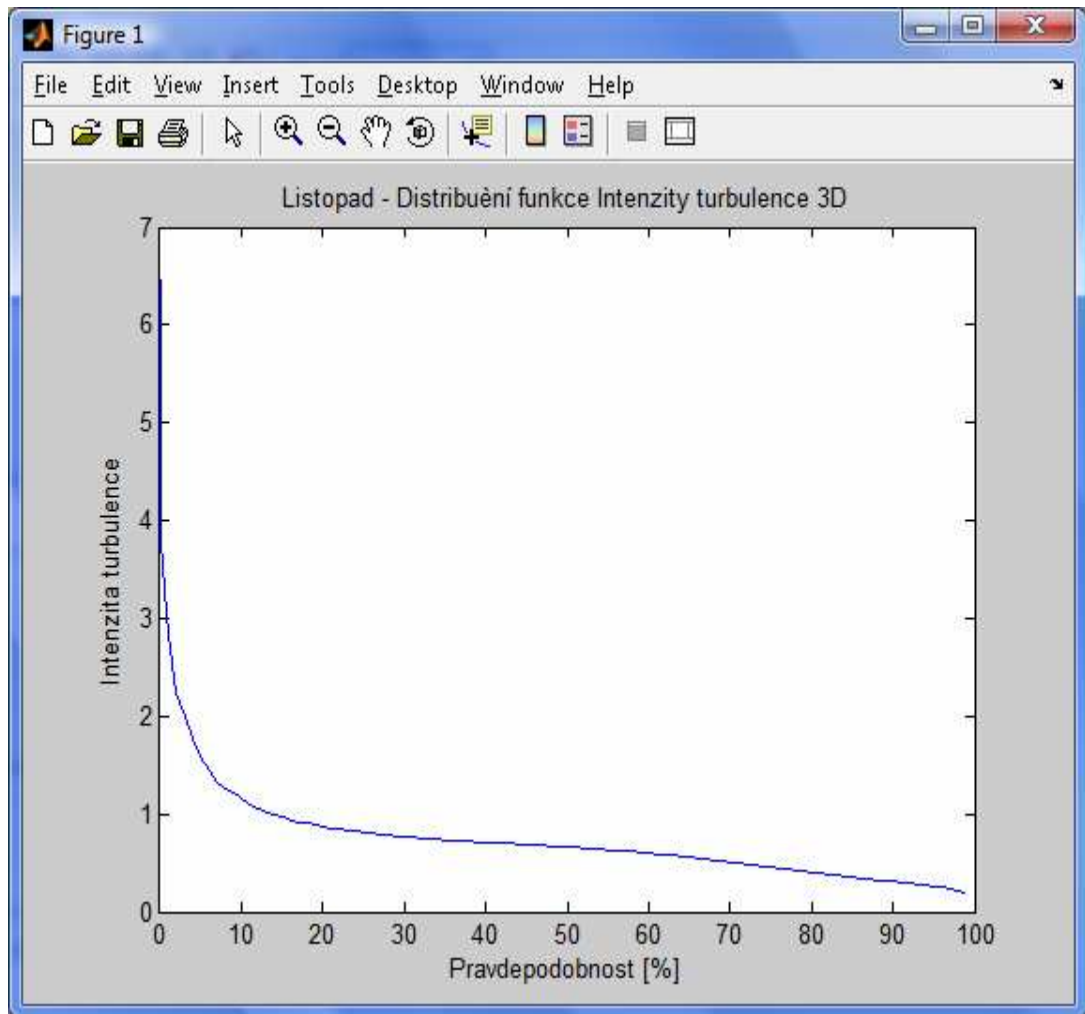




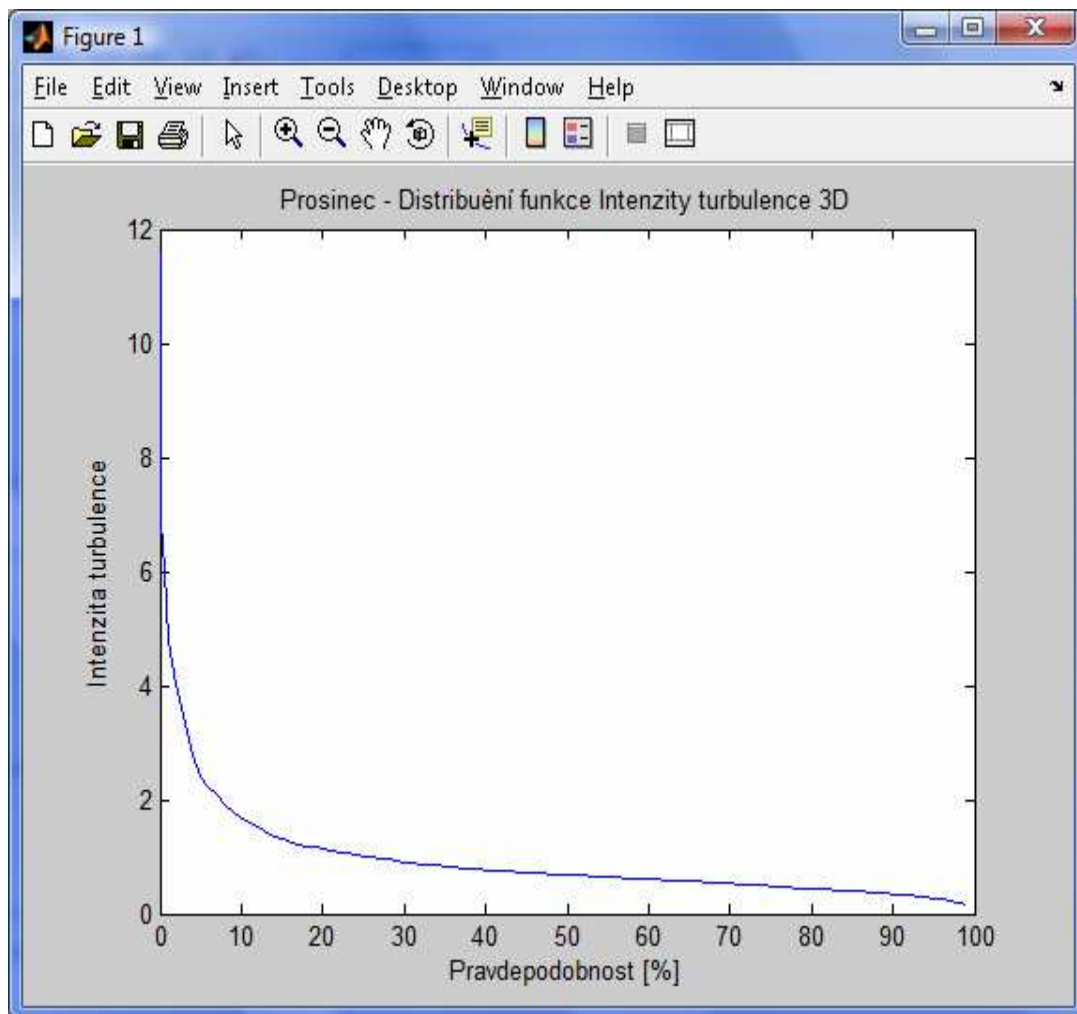
Příloha S Distribuční funkce rychlosti 3D za Únor anemometr-Lampa



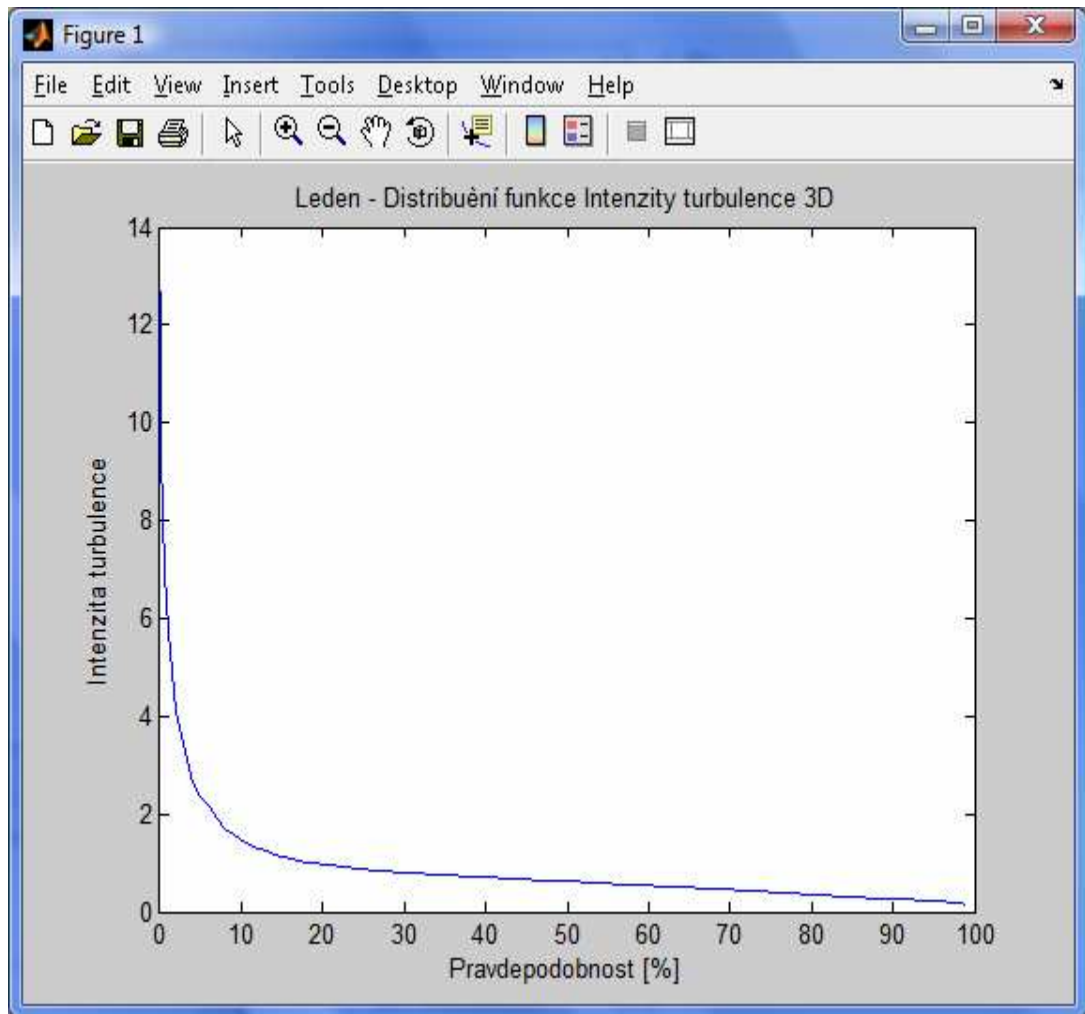
Příloha T Distribuční funkce rychlosti 3D za Březen anemometr-Lampa



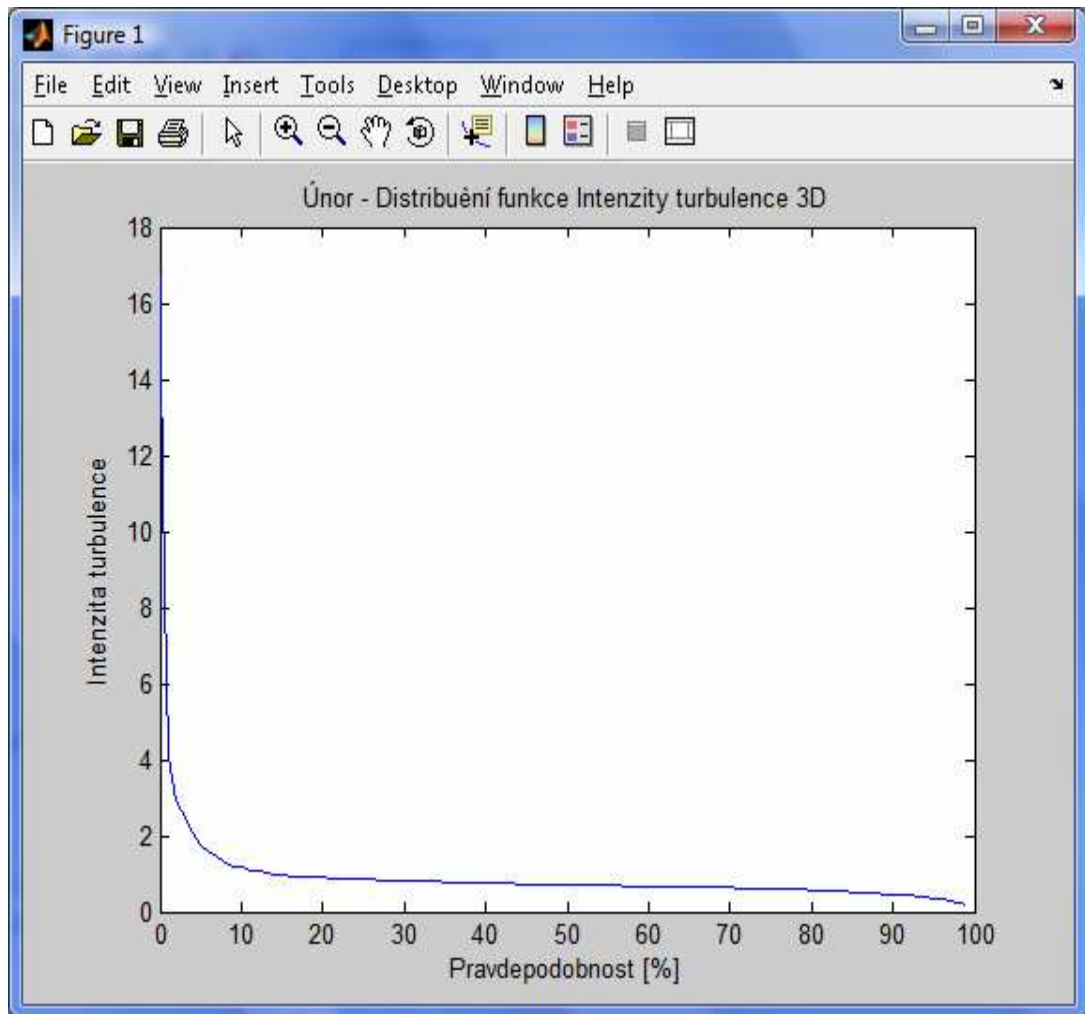
Příloha U Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Listopad anemometr-Lampa



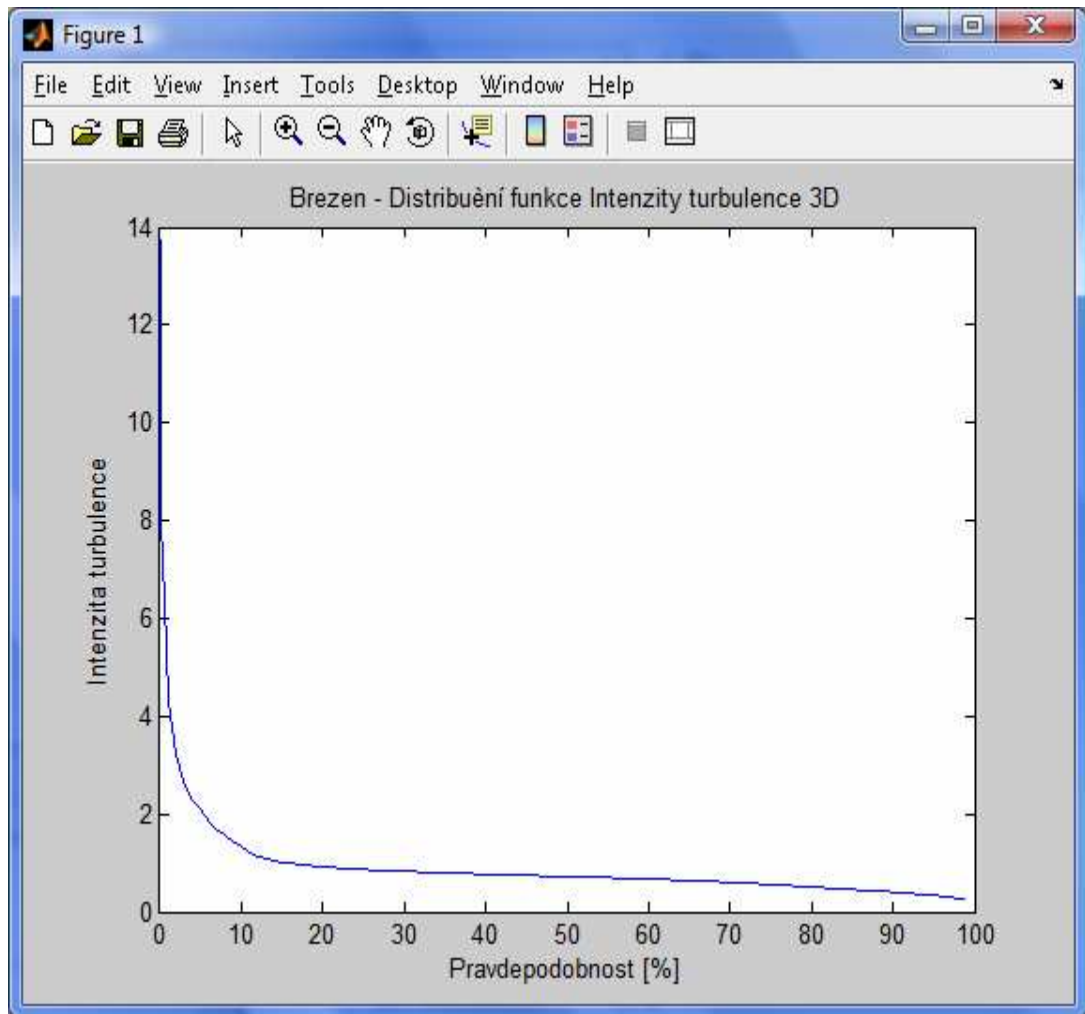
Příloha V Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Prosinec anemometr-Lampa



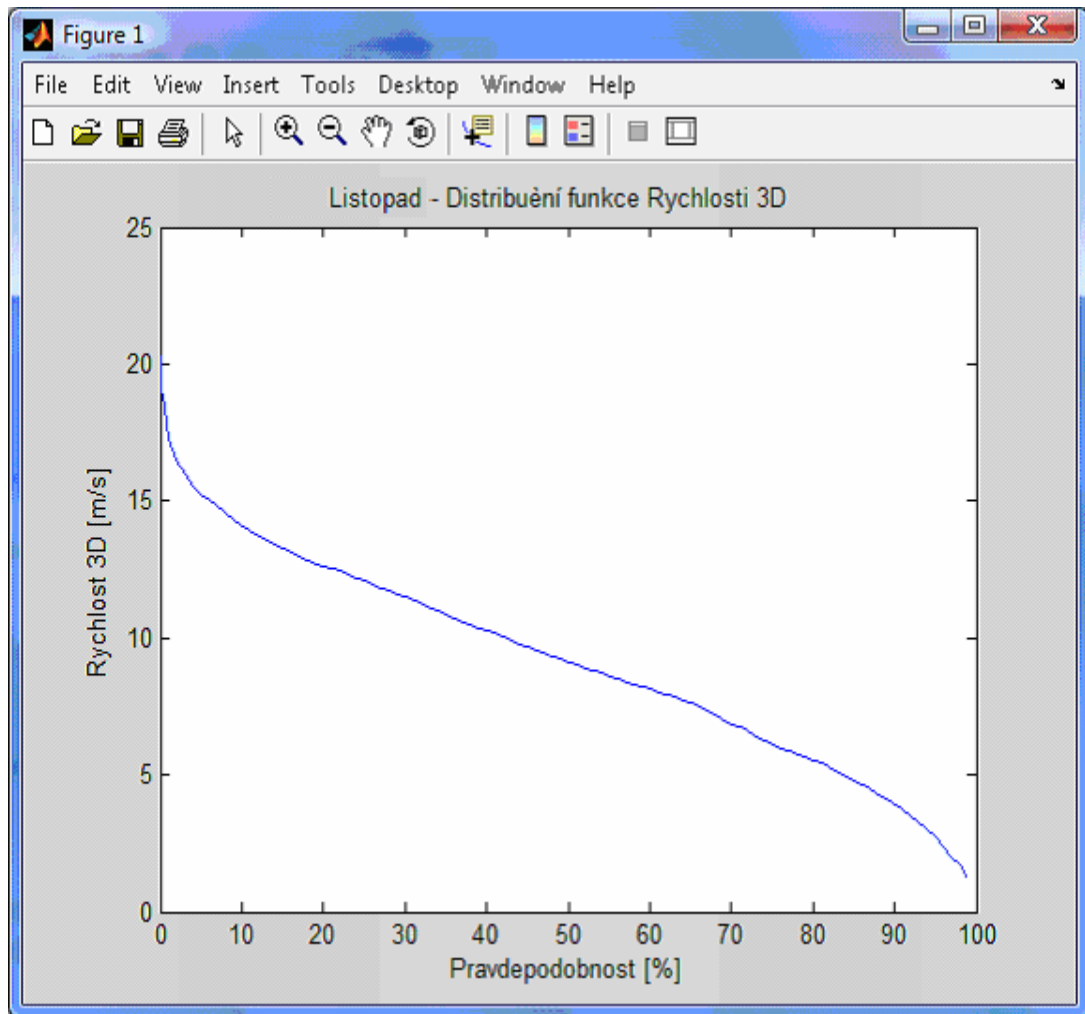
Příloha W Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Leden anemometr-Lampa



Příloha X Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Únot anemometr-Lampa

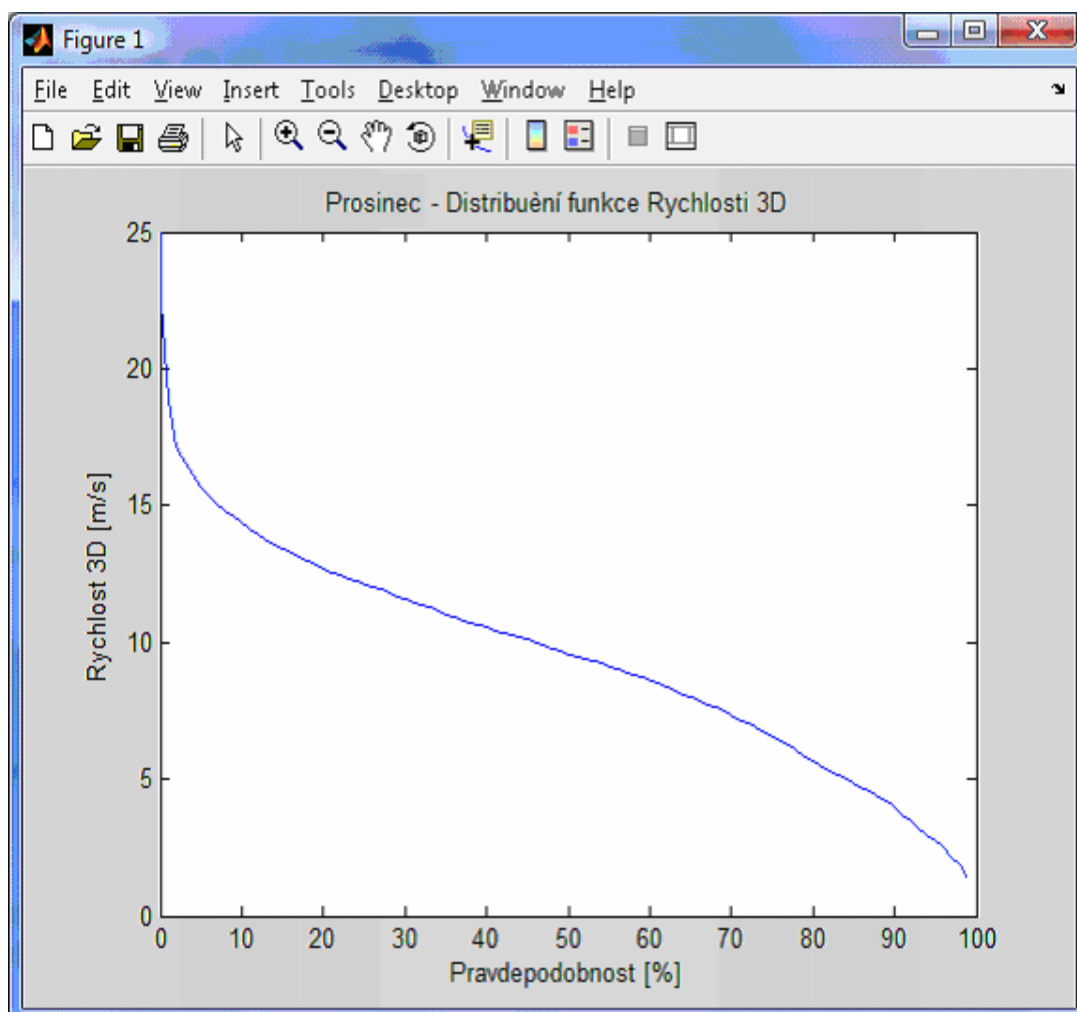


Příloha Y Distribuční funkce Intenzity turbulence 3D za Březen anemometr-Lampa

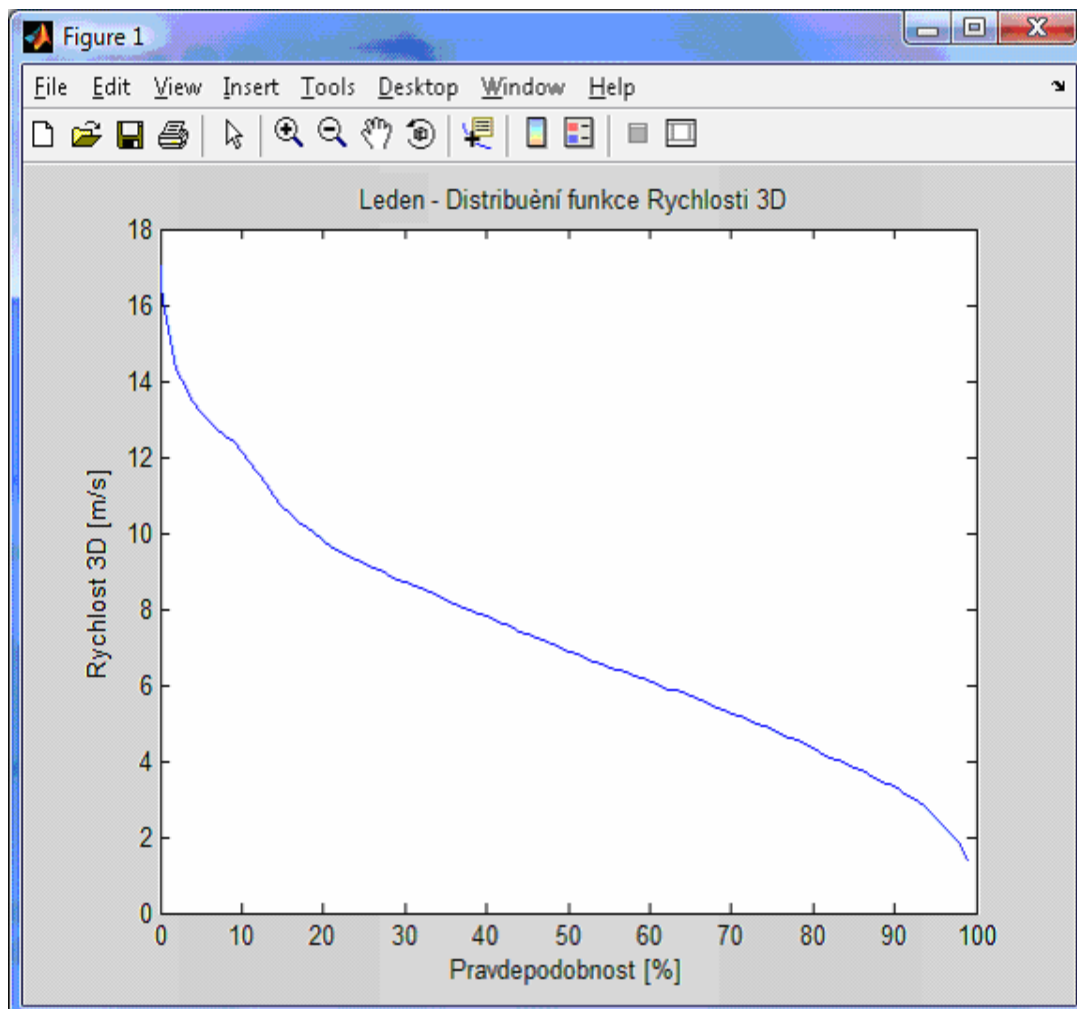


Příloha Z Distribuční funkce rychlosti 3D za Listopad anemometr-Věž

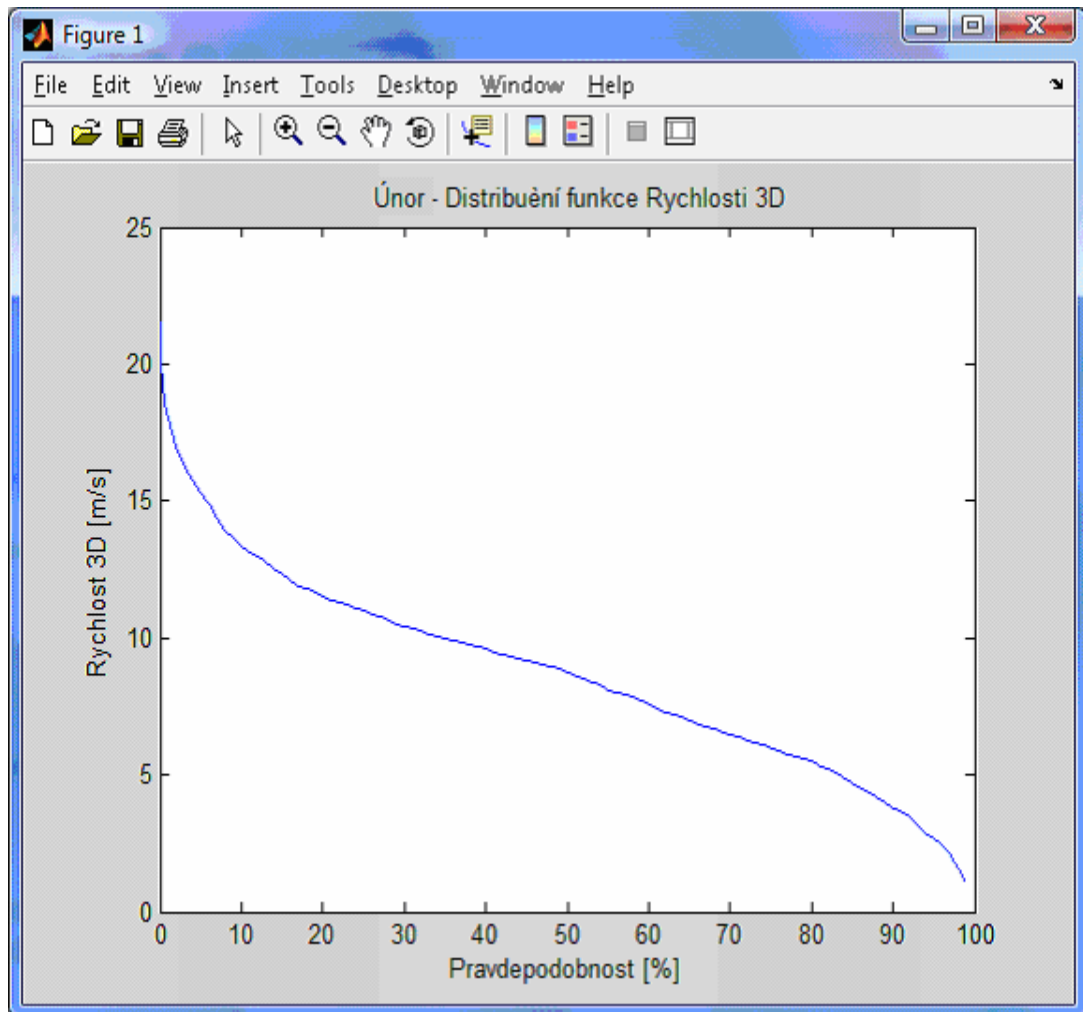




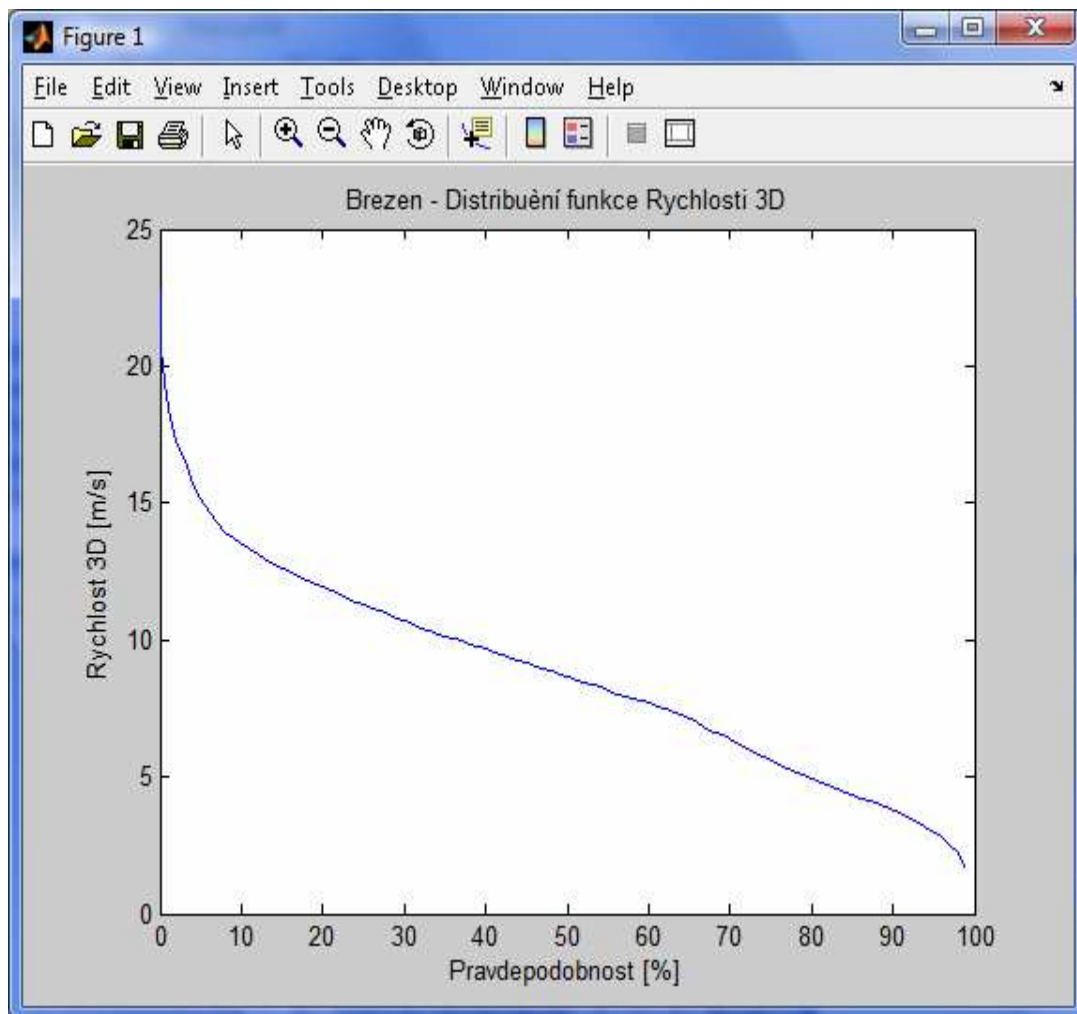
Příloha AA Distribuční funkce rychlosti 3D za Prosinec anemometr-Věž



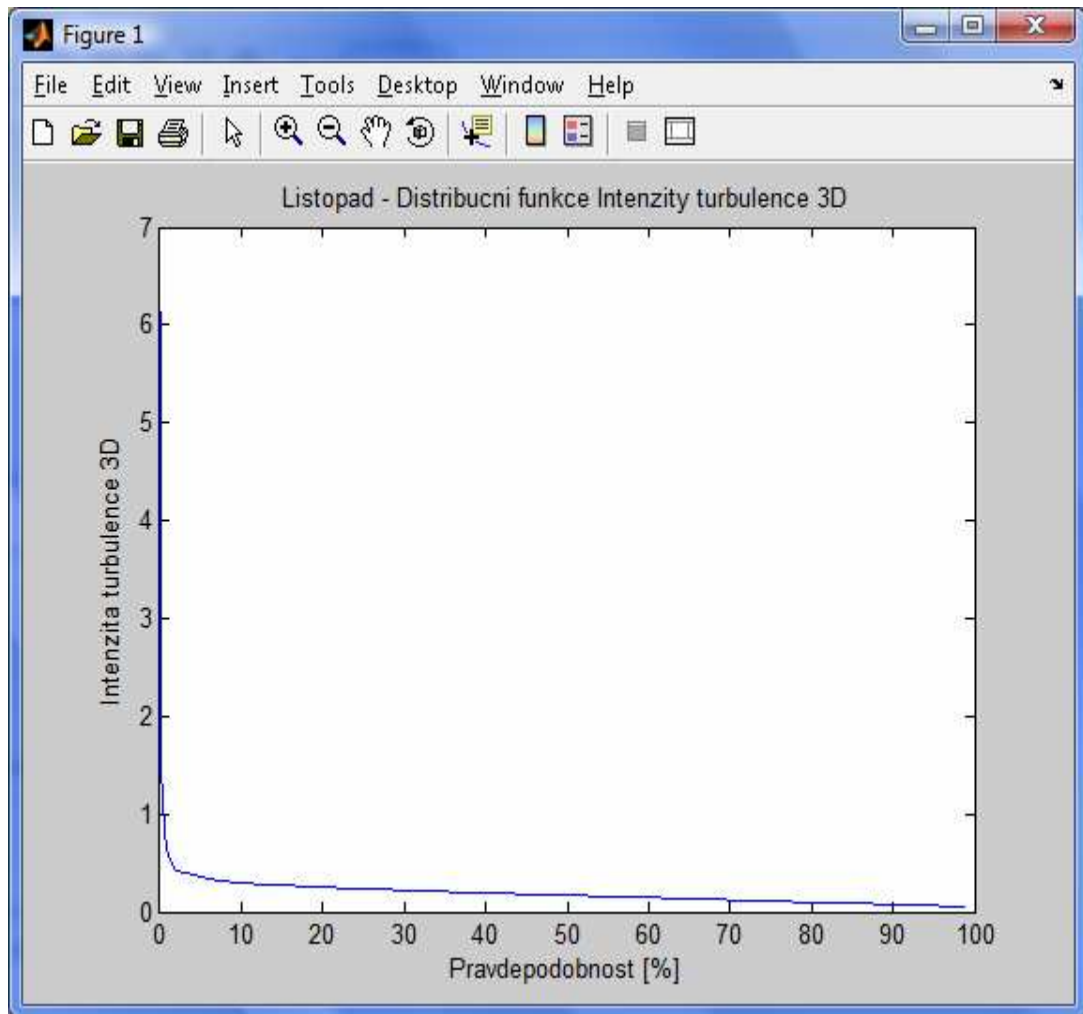
Příloha AB Distribuční funkce rychlosti 3D za Leden anemometr-Věž



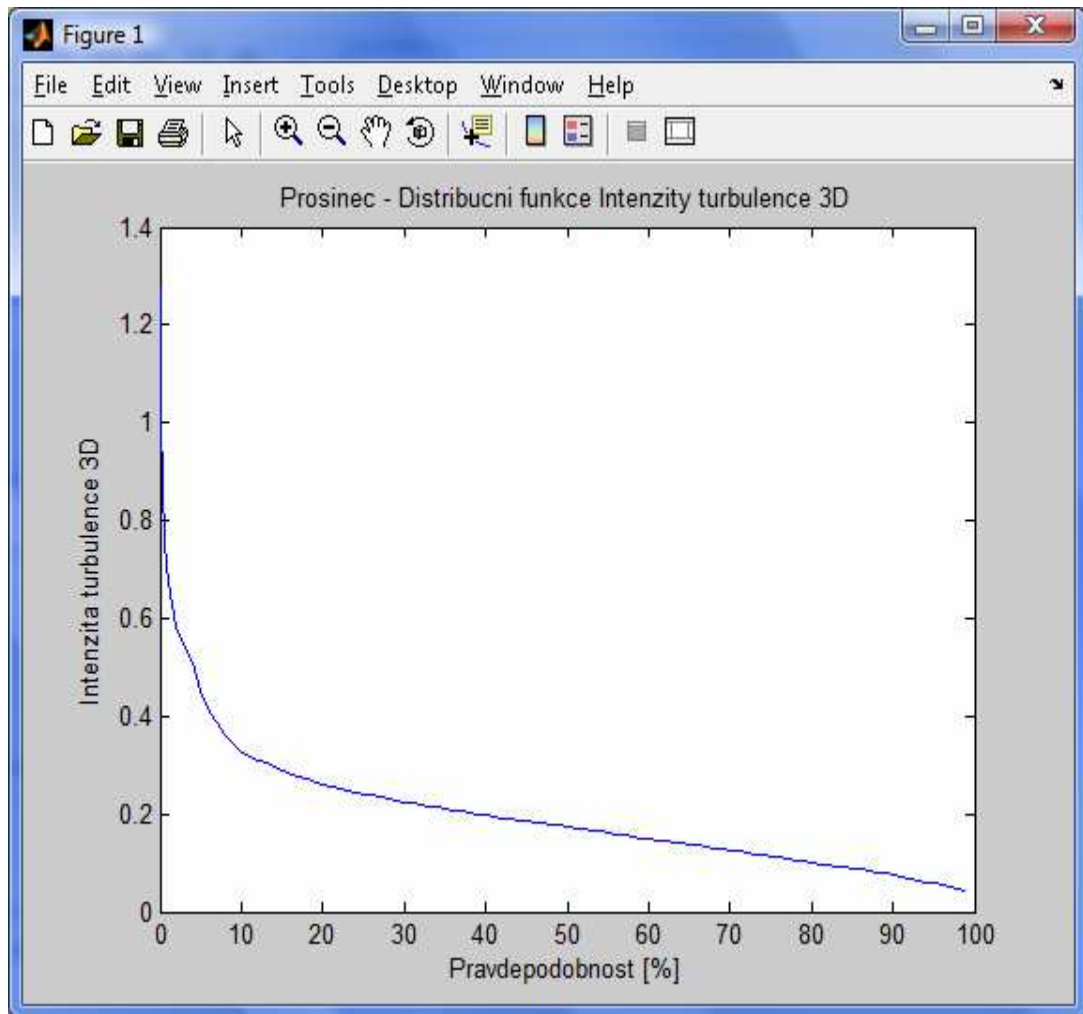
Příloha AC Distribuční funkce rychlosti 3D za Únor anemometr-Věž



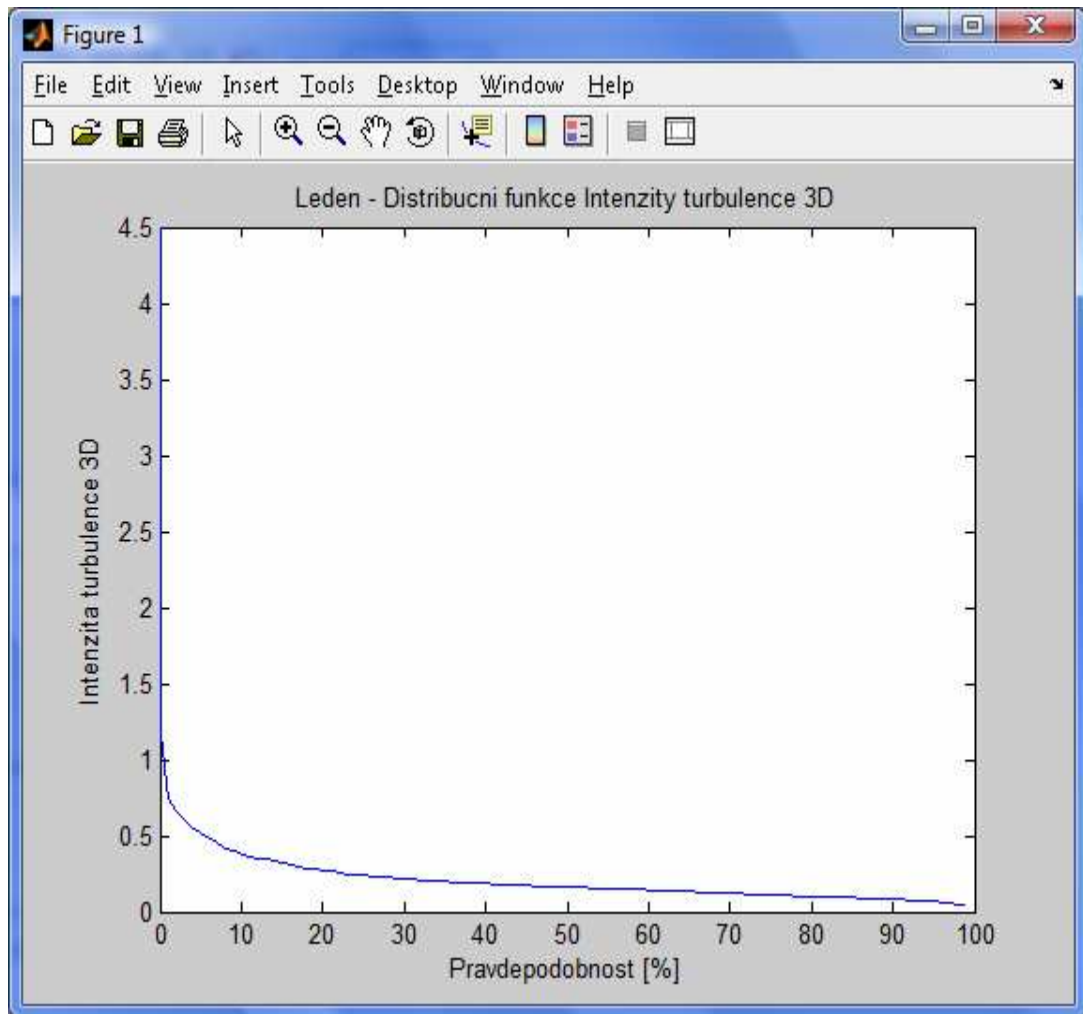
Příloha AD Distribuční funkce rychlosti 3D za Březen anemometr-Věž



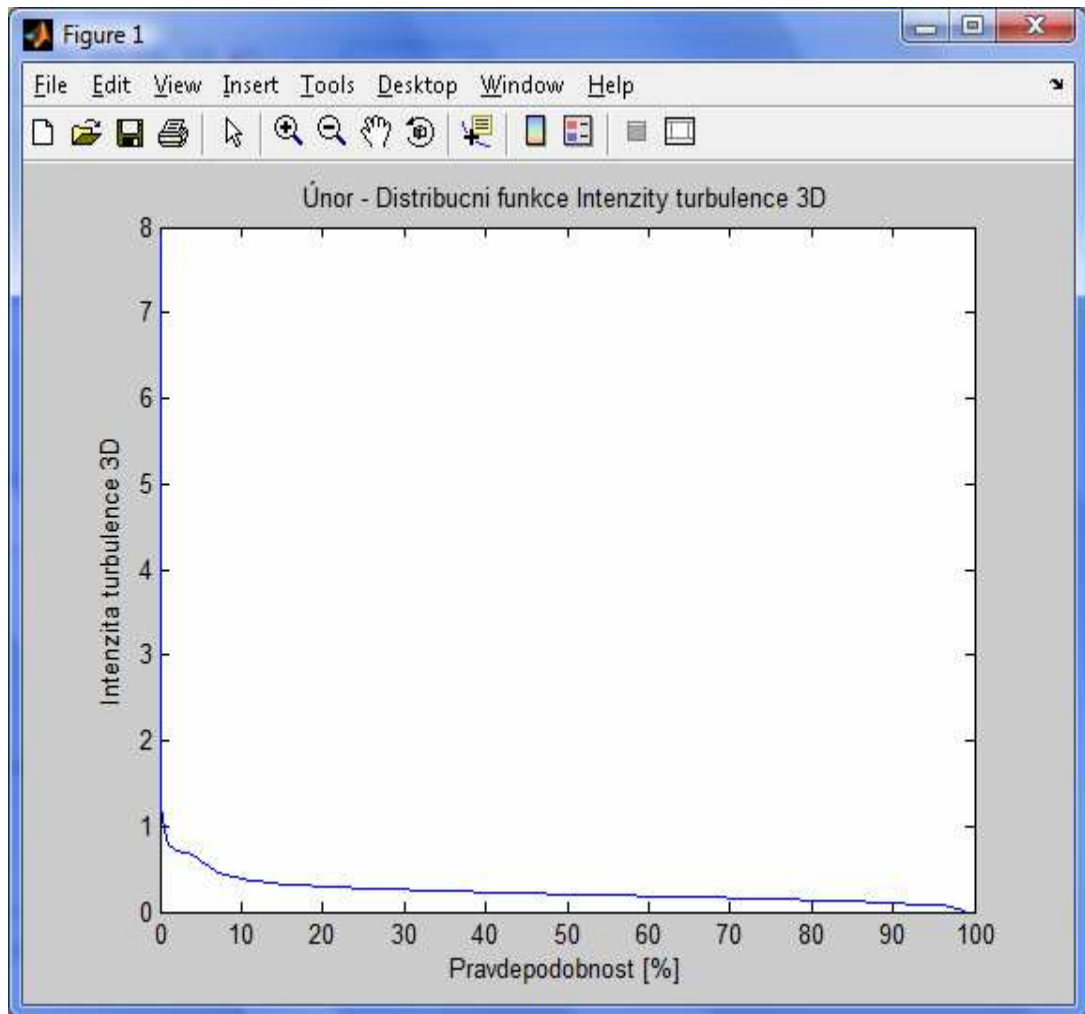
Příloha AE Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Listopad anemometr-Věž



Příloha AF Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Prosinec anemometr-Věž

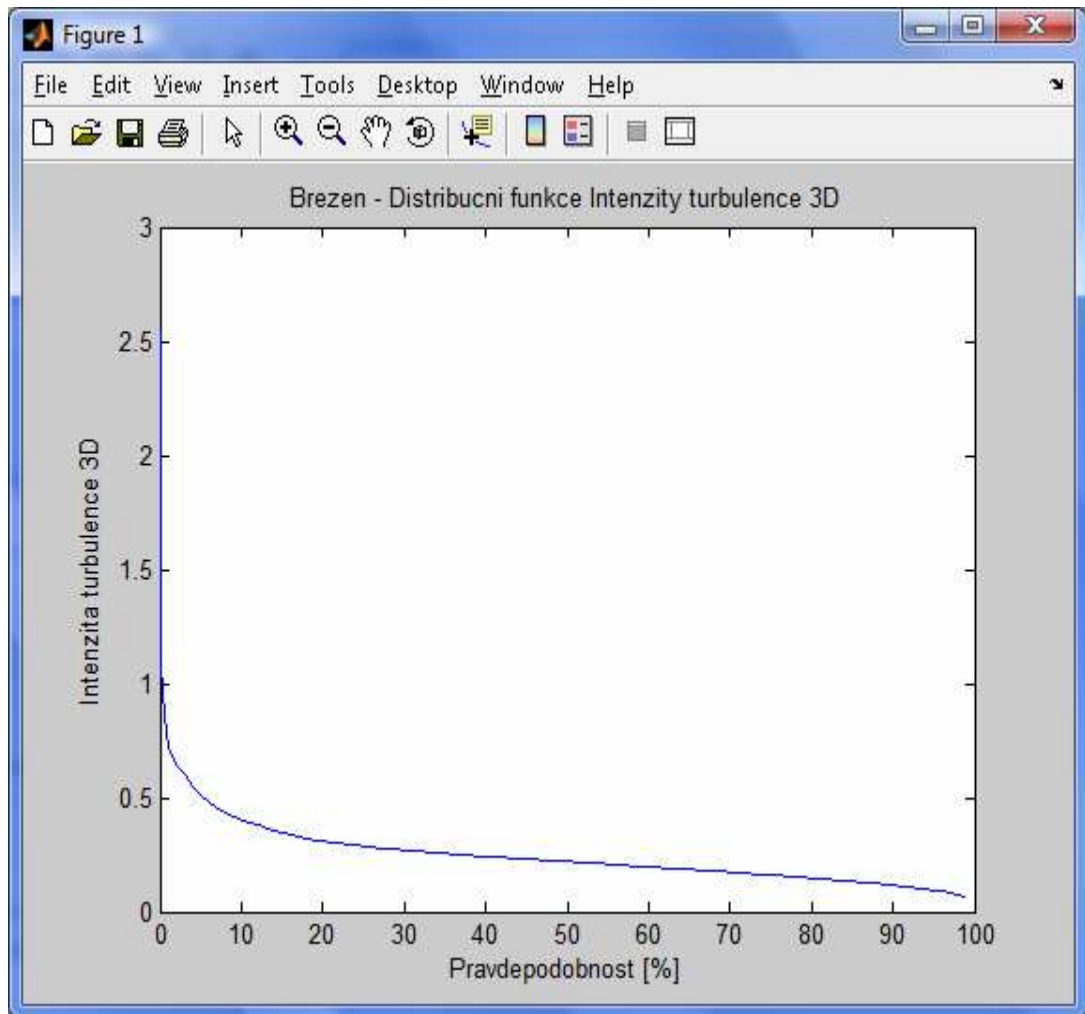


Příloha AG Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Leden anemometr-Věž

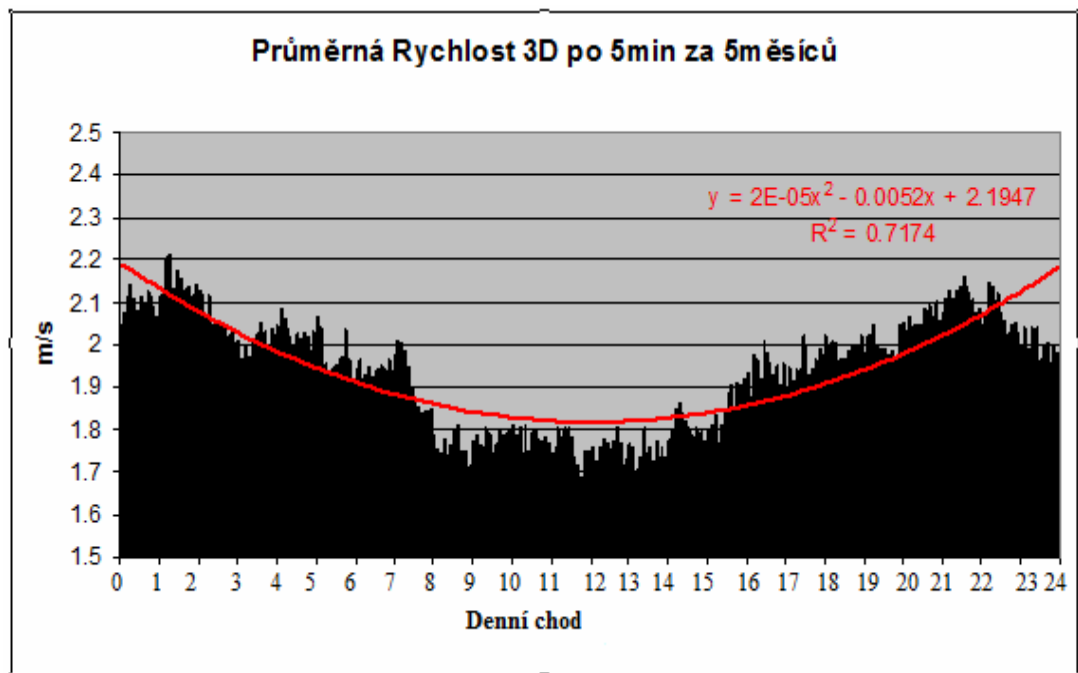


Příloha AH Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Únor anemometr-Věž

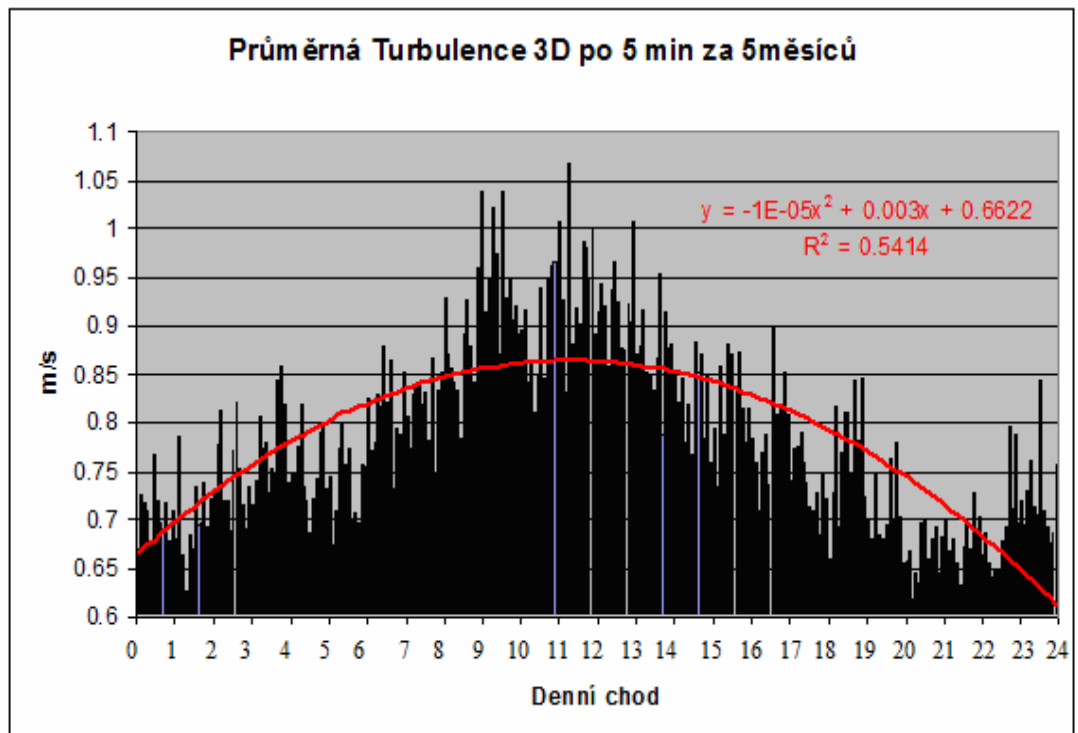




Příloha AI Distribuční funkce intenzity turbulence 3D za Březen anemometr-Věž

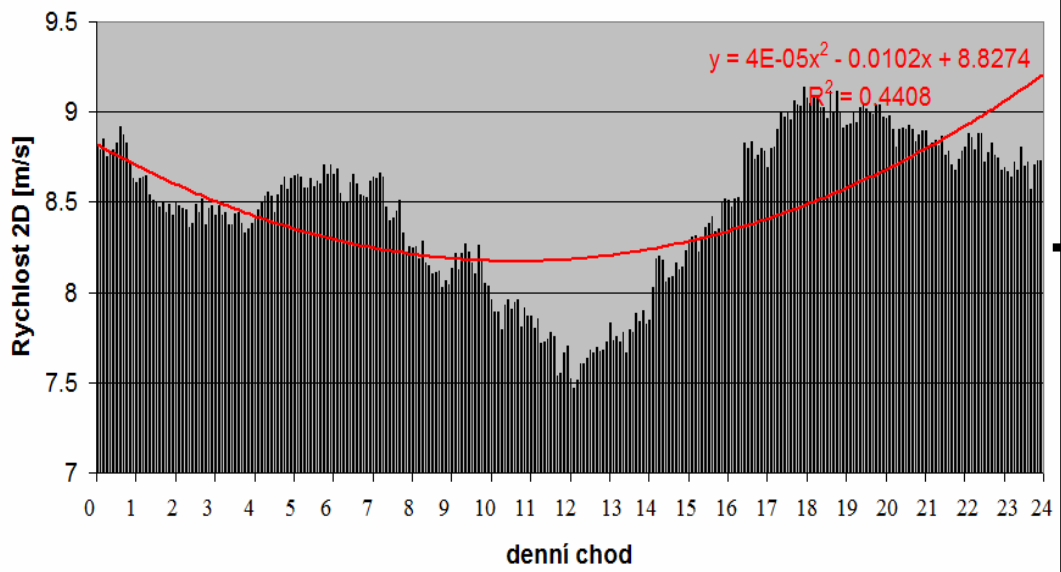


Příloha AJ Průměrná rychlost 3D v denním chodu anemometr-Lampa

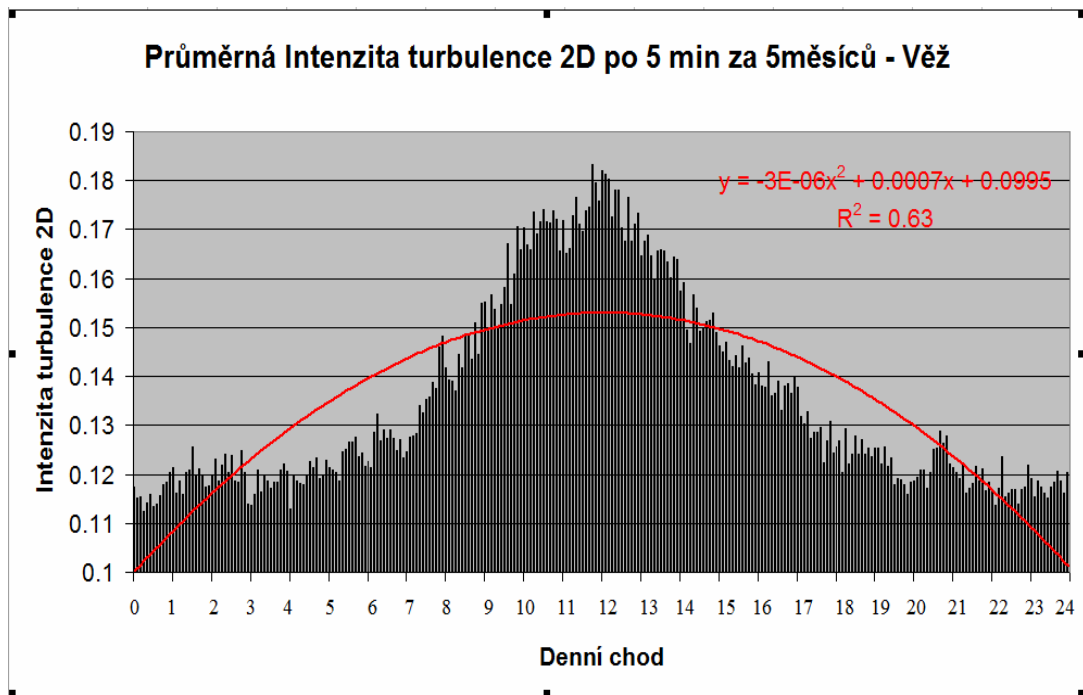


Příloha AK Průměrná intenzita turbulence 3D v denním chodu anemometr-Lampa

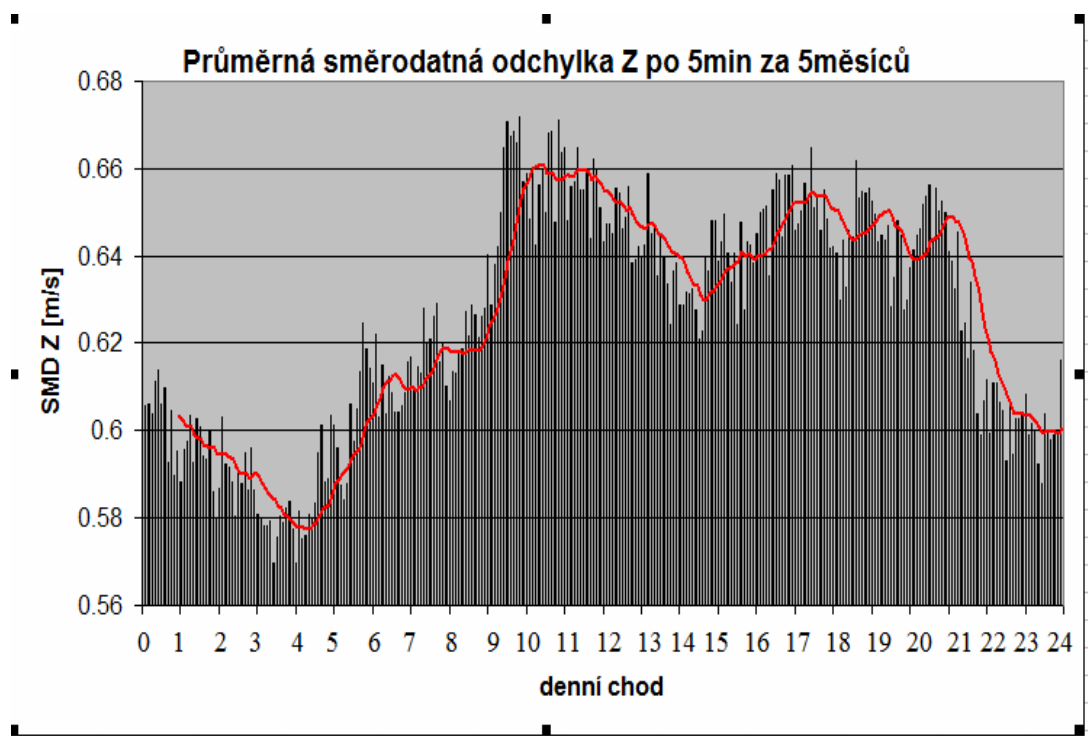
### Průměrná Rychlost 2D po 5min za 5měsíců - Věž



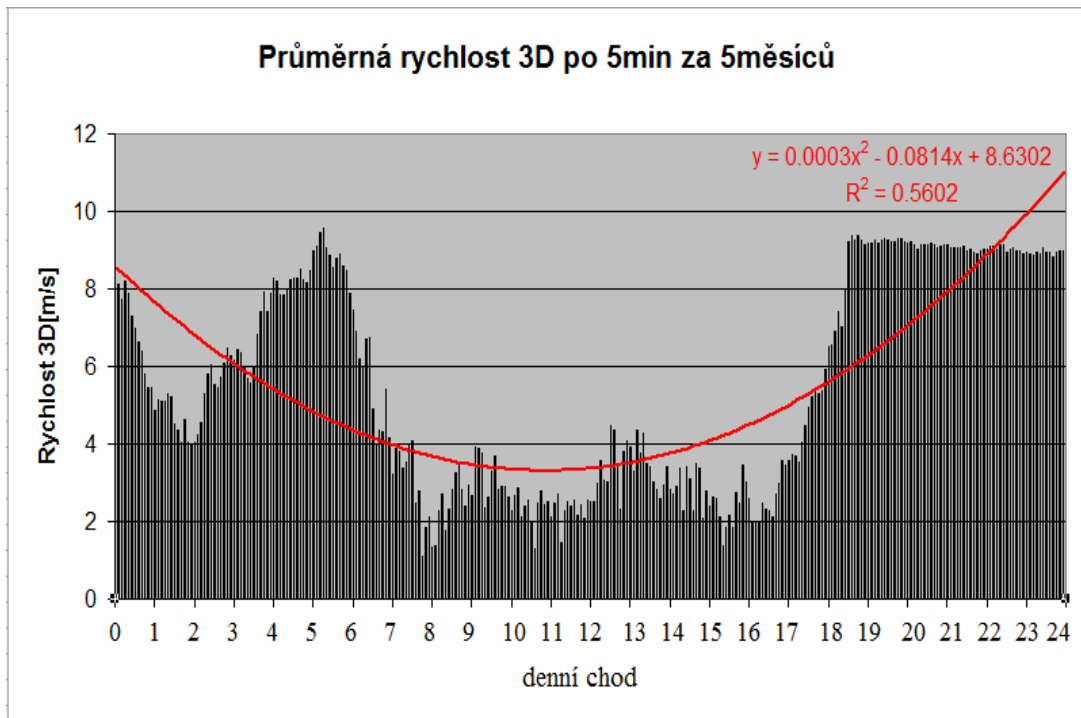
Příloha AL Průměrná rychlost 2D v denním chodu anemometr-Věž



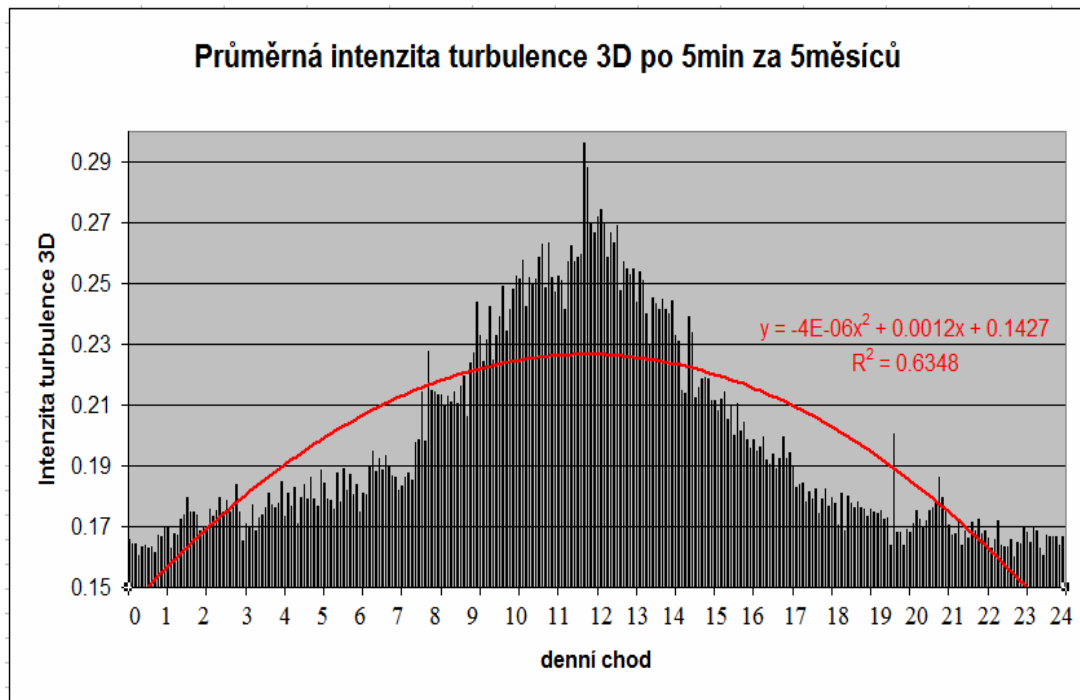
Příloha AM Průměrná intenzita turbulence 2D v denním chodu anemometr-Věž



Příloha AN Průměrná směrodatná odchylka vertikální složky Z v denním chodu anemometr-Věž

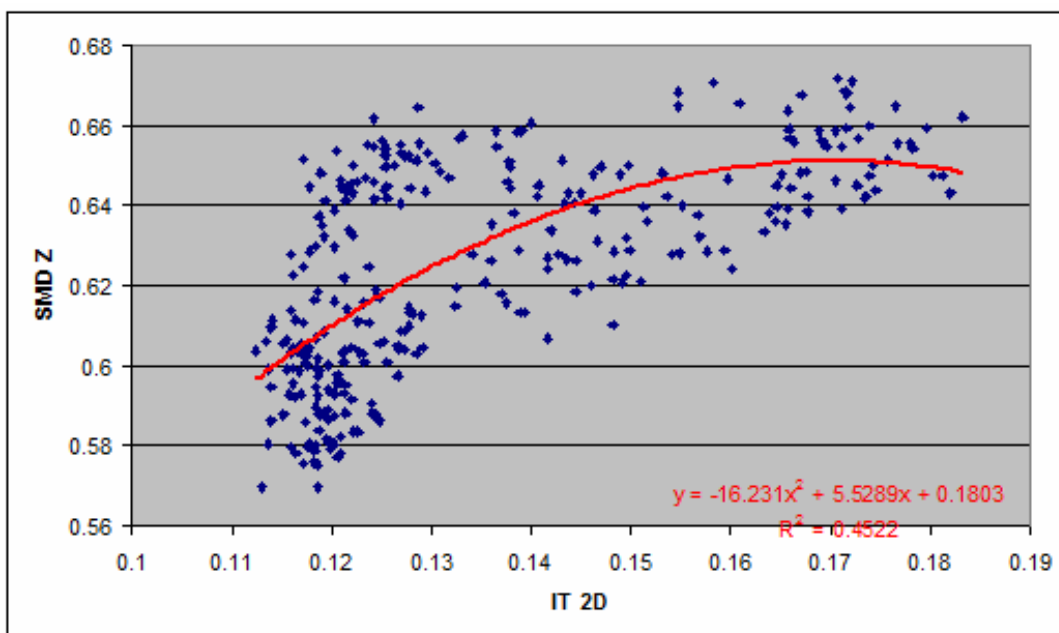


Příloha AO Průměrná rychlost 3D v denním chodu anemometr-Věž



Příloha AP Průměrná intenzita turbulence 3D v denním chodu anemometr-Věž





Příloha AQ závislost mezi intenzitou turbulence 2D a směrodatnou odchylkou Z z anemometru-Věž