



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VĚTRNÉ STROJE PRO OBYDLENÉ OBLASTI

WIND MACHINES FOR URBAN AREAS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Linda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Jakub Linda**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Větrné stroje pro obydlené oblasti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba elektřiny v místě spotřeby má několik výhod. Na druhou stranu většina dostupných technologií tyto výhody degraduje svými vlastnostmi. Jednou z technologií jejíž instalace by mohla přinést více pozitivního než negativního přímo v bezprostředním okolí lidských sídel je větrný stroj.

Cíle diplomové práce:

- (1) Zpracování problematiky výroby elektřiny v hustě obydlených oblastech.
- (2) Rešerše možných typů větrných strojů pro obydlené oblasti.
- (3) Návrh větrného stroje pro konkrétní lokalitu a predikce jeho vlastností a přínosů.

Seznam doporučené literatury:

WILSON, R., LISSAMAN, P. Applied Aerodynamics of Wind Power Machines, 1974. Zpráva grantu No. GI-418340, Oregon State University. Dostupné z <http://ir.library.oregonstate.edu>.

HAU, E. Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics, 2006. 2. vydání. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN – 10-3-540-24240-6.

ŠKORPÍK, J. Větrné turbíny a ventilátory, Transformační technologie, 2011-06, [last updated 2019-0-08]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/22.html>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Predložená diplomová práca sa zaoberá veternými strojmi v husto obývaných oblastiach. Cieľom práce je navrhnúť vhodný veterný stroj pre použitie na strechách budov pri zahrnutí všetkých špecifik, ktoré môže prúdenie vzduchu v meste obsahovať. Na začiatku sa práca venuje výrobe elektrickej energie v mestách vo všeobecnosti, z čoho vyplýva ideálny systém získavania energie pre domácnosti. Ďalej sa práca venuje vetru vo všeobecnosti, kde sú prebraté všetky jeho špecifiká. Veľmi dôležitou časťou práce je štúdia špecifik prúdenia vzduchu v mestskom prostredí spolu s numerickou simuláciou tohto prúdenia, z čoho vyplývajú isté zákonitosti umiestnenia veterných strojov na strechách budov. Práca potom prechádza na rešerš používaných veterných strojov z čoho je následne vybraný najhodnejší kandidát pre použitie v mestách. Poslednou časťou práce je návrh samotného stroja pre konkrétne zvolenú lokalitu. V tejto kapitole je z nameraných dát určená návrhová rýchlosť vetra, na čo neskôr nadväzuje výpočet geometrie lopatiek a na koniec sú z vlastností veterného stroja určené jeho prínosy a benefity.

Kľúčové slová

Získavanie energie v meste, veterný stroj, prúdenie vzduchu v meste, teória lopatkovej mreže

ABSTRACT

The submitted diploma thesis deals with wind machines in densely populated areas. The aim of the work is to design a appropriate wind machine for use on the roofs of buildings, including all the specifics that the air flow in the city may contain. At the beginning, the work focuses on the production of electricity in cities in general, which results in an ideal system of obtaining energy for households. Furthermore, the work deals with the wind in general, where all its specifics are taken over. A very important part of the work is the study of the specifics of air flow in the urban environment together with the numerical simulation of this flow, which results in certain regularities of the location of wind machines on the roofs of buildings. The work then passes to a search of used wind machines, from which the most suitable candidate for use in cities is subsequently selected. The last part of the work is the design of the machine itself for a specific location. In this chapter, the design wind speed is determined from the measured data, which is later followed by the calculation of the geometry of the blades, and finally its benefits and advantages are determined from the properties of the wind machine.

Key words

Energy generation in the city, wind machine, air flow in the city, blade grid theory.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

LINDA, Jakub. *Větrné stroje pro obydlené oblasti*. Brno, 2020. 147 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125724>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Škorpík.

PREHLÁSENIE AUTORA

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na téma Větrné stroje pre obydlené oblasti vypracoval(a) samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňou, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

.....
Datum

Meno a priezvisko

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať Ing. Jiřímu Škorpíkovi, Ph.D. za veľmi cenné rady a pripomienky, vďaka ktorým som pochopil nie len fungovanie veterných turbín, ale aj veľa oblastí z energetiky celkovo. Tiež by som sa chcel poďakovať Ing. Jakubovi Elcnerovi Ph.D. za veľkú pomoc a čas mne venovaný pri vytváraní a nastavovaní simulácie prúdenia vzduchu. Moja veľká vďaka tiež patrí mojej rodine a priateľke, bez ktorých by bolo vytváranie tejto práce a štúdium celkovo omnoho náročnejšie.

OBSAH

ÚVOD.....	13
1 Výroba elektrickej energie v husto zastavaných oblastiach	14
1.1 Energetická spotreba budov	14
1.2 Výroba elektrickej energie v domácnostiach	16
1.2.1 Fotovoltaické panely	17
1.2.2 Malé veterné turbíny	18
1.3 Akumulácia energie a riadenie toku energií v domácnostiach	19
1.4 Výhody a nevýhody decentralizovanej výroby elektriny	20
1.5 Kombinácia slnečnej a veternej energie	22
1.6 Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 1	23
2 Vietor	24
2.1 Pôvod energie vetra a jej podiel na celkovej energii Zeme	24
2.2 Vznik vetra.....	25
2.3 Hlavné a pravidelné pohyby vzduchu na Zemi.....	27
2.3.1 Iné menšie pravidelné pohyby vzduchu	28
2.4 Energia vetra	32
2.5 Charakteristiky vetru.....	34
2.5.1 Rýchlosť vetru.....	35
2.5.2 Početnosť rýchlosti vetru	37
2.5.3 Smer vetru	39
2.5.4 Nárazovosť vetru	40
2.6 Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 2.....	41
3 Špecifiká prúdenia vzduchu v obývaných oblastiach.....	42
3.1 Závislosť rýchlosti vzduchu na výške a reliéfe povrchu	42
3.2 Vplyv zmeny drsnosti povrchu na rýchlostný profil vetra	45
3.3 Vplyv osamotených prekážok na prúdenie vzduchu	47
3.3.1 Turbolencie vznikajúce v okolí prekážky	48
3.3.2 Veterná situácia na horách a vyvýšeninách.....	50
3.4 Popis prúdenia v meste a mestská medzná vrstva	51
3.4.1 Popis plne rozvinutého mestského rýchlostného profilu.....	51
3.5 Simulácia prúdenia v mestskom prostredí	52
3.5.1 Princíp numerických simulácií.....	53
3.5.2 Nastavenie geometrie modelu	54

3.5.3	Modely fyziky simulácie	56
3.5.4	Nastavenie okrajových podmienok.....	57
3.5.5	Nastavenie výpočtovej siete	58
3.5.6	Vyhodnotenie simulácie pre osamotené prekážky	59
3.5.7	Vyhodnotenie simulácie pre rad prekážok	61
3.5.8	Ideálne umiestnenie na streche	64
3.5.9	Poruchy idealizovaného radu budov.....	65
3.5.10	Správnosť riešenia	67
3.6	Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 3	67
4	Veterné stroje	69
4.1	Rozdelenie veterných strojov	69
4.1.1	Stroje pracujúce na odporovom princípe	69
4.1.2	Stroje pracujúce na vztlakovom princípe	71
4.2	Obmedzenia a princípy veterných strojov	73
4.2.1	Princíp odporových veterných strojov	73
4.2.2	Princíp vztlakových veterných strojov	74
4.2.3	Poznatky vyplývajúce z prúdovej teórie.....	77
4.3	Aerodynamika profilov lopatiek	78
4.3.1	Aerodynamika osamoteného profilu.....	79
4.3.2	Aerodynamika lopatkovej mreže veternej turbíny	80
4.4	Veterné stroje vhodné pre zastavané oblasti	81
4.4.1	Najvhodnejšie zariadenie pre mestské prostredia.....	83
4.5	Konštrukcia veternej turbíny vrtuľového typu	85
4.6	Zapojenie veternej turbíny.....	86
4.6.1	Ostrovny systém zapojenia	86
4.6.2	Systém pripojený na rozvodnú sieť	87
4.6.3	Systém zapojenia vhodný pre mestské prostredia	88
4.7	Komerčne predávané malé veterné turbíny	89
4.8	Veterný stroj pracujúci na princípe kmitania	90
4.8.1	Vznik vírov pri obtekaní telies	91
4.8.2	Energia kmitajúceho systému	93
4.8.3	Časti kmitajúceho zariadenia	94
4.8.4	Výhody kmitajúceho zariadenia	96
4.9	Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 4.	96

5	Návrh veterného stroja.....	98
5.1	Výber lokality pre veterný stroj.....	98
5.1.1	„Bežný deň“ na staniach.....	100
5.1.2	Spracovanie získaných dát.....	101
5.1.3	Weibullove rozdelenie.....	103
5.1.4	Závery vyplývajúce zo spracovania dát.....	105
5.1.5	Určenie návrhovej rýchlosti vetra pre veterný stroj.....	106
5.2	Výpočet veterného stroja.....	108
5.2.1	Teória lopatkovej mreže.....	108
5.2.2	Výber vhodného aerodynamického profilu.....	110
5.2.3	Určenie priemeru rotoru.....	113
5.2.4	Určenie výkonu zariadenia.....	113
5.2.5	Generátor pre veterný stroj.....	114
5.2.6	Voľba počtu lopatiek a súčiniteľa rýchlobežnosti.....	115
5.2.7	Zhrnutie vypočítaných a zvolených veličín.....	116
5.2.8	Výpočet lopatiek turbíny.....	116
5.2.9	Výkon a účinnosť stroja.....	121
5.2.10	Korekcia výpočtu veterného stroja.....	121
5.2.11	Výkon a účinnosť skorigovanej veternej turbíny.....	125
5.3	Vlastnosti a prínosy navrhnutého veterného stroja.....	126
5.3.1	Množstvo energie vyrobenej strojom.....	126
5.3.2	Využitelnosť veternej elektrárne.....	129
5.3.3	Podpora výroby energie z obnoviteľného zdroja.....	129
5.3.4	Množstvo ušetreného CO ₂	131
5.3.5	Množstvo ušetrenej energie pri prenose.....	133
5.3.6	Zálohovanie veterného zdroja.....	133
5.4	Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 5.....	134
	ZÁVER.....	136
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV.....	138
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	143

ÚVOD

V dnešnej dobe sa ľudstvo čoraz častejšie zaoberá možnosťou využitia zelenej, teda obnoviteľnej energie. Výmenou energetických zdrojov z neobnoviteľných na obnoviteľné sa má zabrániť alebo aspoň spomaliť globálne otepľovanie a tiež dosiahnuť dlhodobú energetickú udržateľnosť pre ďalšie generácie.

Neobnoviteľné zdroje energie, ako sú napríklad uhľové elektrárne alebo plynové elektrárne spaľujú fosílnu palivú a pri spaľovaní vypúšťajú do atmosféry skleníkové plyny, ktoré prispievajú ku skleníkovému efektu a teda k globálnemu otepľovaniu. Ich ďalším problémom je ich vyčerpatelnosť, ak by ťažba fosílnych palív pokračovala v nasadenom tempe ďalej, v istom momente by sa mohlo stať, že nám ako ľudstvu tieto zdroje úplne dôjdu.

Naopak obnoviteľné zdroje energie tento zásadný problém nemajú. Medzi tieto zdroje patrí energia slnka, geotermálna energia, energia vetru, energia vodných tokov a energia pri spracovaní biomasy a iných produktov rastlinného pôvodu. Tieto zdroje sa v dnešnej dobe dostávajú do popredia, čo sa týka plánovania rozširovania energetickej výroby. Samozrejme, nie všade možno tieto typy zdrojov využiť. Pre stavbu veľkej veternej elektrárne je potrebné nájsť miesto so stálym a silným vetrom. Pri slnečnej elektrárni je zase nutné vyčleniť veľké množstvo priestoru. Na stavbu väčšej vodnej elektrárne treba postaviť hrádzu a zatopiť istú časť územia. Ich ďalšou nevýhodou je, že pri istých nevhodných klimatických podmienkach môže tento zdroj energie úplne vypadnúť z produkcie, naopak neobnoviteľné zdroje energie sú voči výrazným výkyvom počasia oveľa imúnnejšie. Niektorým z týchto problémom sa dá vyhnúť ak sa jedná o menšie domáce zariadenia, z toho ale nutne vyplýva aj zmenšená produkcia energie.

Aj energia pochádzajúca z vetra má svoje pre a proti. Jej najčastejšie využitie je vo forme veterných elektrární, kedy sa energia odobratá z vetra premieňa na mechanickú energiu pohybu rotoru a z rotoru sa energia odoberá pomocou generátoru vo forme elektrickej energie. Výroba elektrickej energie nie je ale jediným využitím vetra, existuje aj široká škála pracovných strojov, ktoré využívajú vietor ako pohon, nie sú však veľmi rozšírené, najmä v minulosti ale boli. Ako jej plusy sú známe jej obnoviteľnosť a jednoduchosť zariadení. Jej nevýhody sú však tiež známe, a to napríklad najčastejšie skloňovaný vizuálny efekt na krajinu (väčšinou sú najveternejšie územia hornaté a tieto hory sú zároveň národnými parkami) a tiež premenlivosť dodávaného výkonu. Ako vhodné lokality sa stavbu veternej elektrárne sa uvádzajú územia s častým výskytom vetru o rýchlosti od 5 m/s.

Ďalším trendom dnešného sveta je decentralizácia zdrojov. Množstvo príbytkov a domácností využíva solárne panely ako čiastočný zdroj energie. Tento trend sa v budúcnosti bude veľmi pravdepodobne rozširovať. Veterná energia má v tomto pohľade tiež svoje miesto. Malé veterné elektrárne sú dostupné a dajú sa jednoducho kúpiť. Nie je ich toľko ako solárnych panelov čo sa množstva týka, ale spolu s nimi môžu pre domácnosti poskytovať vyrovnanejší a pravidelnejší zdroj vzhľadom na výkyvy počasia.

Obnoviteľné či neobnoviteľné zdroje, spotreba energie jednoznačne rastie. S tým súvisí aj rozširovanie zdrojov energie. Je zrejme, že vzhľadom na dlhodobú udržateľnosť sú zelené zdroje jednoznačne vhodnejšie. Síce majú svoje muchy, ale s postupným zdokonaľovaným technológií sa tieto zdroje stávajú čoraz atraktívnejšie a používanéjšie nie len vo veľkej mierke ale aj ako malé domáce zdroje a práve o tom bude nasledujúca práca.

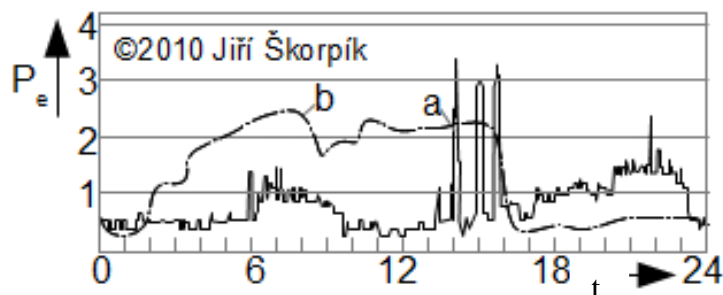
1 Výroba elektrické energie v husto zastavaných oblastech

Odpověďou na akutní otázky energetiky dnešního světa jako sú například riešenie stále zvyšujúcej sa spotreby elektrickej energie a aj zvyšujúce sa množstvá vyprodukovaných skleníkových plynov môže byť z časti zníženie energetickej spotreby miest. Znížiť energetickú spotrebu miest je možné viacerými spôsobmi, jedným zo spôsobom je šetriť energiu, teda ju vôbec nespotrebovať, to sa však vylučuje so zvyšujúcou sa potrebou na komfort obyvateľstva. Ďalšou možnosťou je znížiť energetickú spotrebu budov, dá sa to vyriešiť zateplením, ako aj zvýšením energetických tepelných ziskov zo slnka (pri použití veľkých viacvrstvových okien). Budovy však môžu znížiť spotrebu energie prichádzajúcej z veľkých elektrární ešte jedným spôsobom a to výrobou elektriny v rámci budovy pre potreby vlastnej spotreby (alebo aj vývoz energie pri prebytkoch). V nasledujúcej kapitole budú preskúmané možnosti výroby elektriny pre husto zastavané oblasti a pre jednotlivé budovy samostatne, teda oblasti, kde tradičné a veľké zdroje energie nemôžu byť umiestnené.

1.1 Energetická spotreba budov

Energetická spotreba sa líši od budovy k budove, veľmi záleží, akým spôsobom je budova využívaná. Samozrejme, najväčšiu spotrebu budú mať priemyselné podniky. Práca je však venovaná husto zastavaným oblastiam, teda skôr oblastiam určeným na bývanie, administratívu, kultúru ako sú napríklad centrá a obývané časti miest, teda oblasti, kde sa sústreďuje priemysel nie sú predmetom skúmania.

Základnou jednotkou obývaných oblastí je dom alebo byt. Preto je priblížená energetická spotreba takéhoto typu budov. Denný priebeh spotreby elektrického príkonu domácnosti je zhruba nasledujúci.



Obr. 1.1 Elektrický príkon domácnosti v priebehu dňa [46]

a- krivka spotreby domu, b-výkon novej malej elektrárne v domácnosti založenej na obnoviteľných zdrojoch (P_e -príkon [kW], t-čas [h])

Ako je vidieť z obr. 1.1, denná spotreba domácnosti je silno závislá od režimu ľudí, ktorý v nej bývajú. Je viditeľný nárast príkonu ráno, keď sa ľudia zobudia a poobede, kedy zase prídu z práce. Dá sa očakávať, že príkon budov, ktoré slúžia ako pracoviská bude práve opačný, s minimom spotreby v čase obeda.

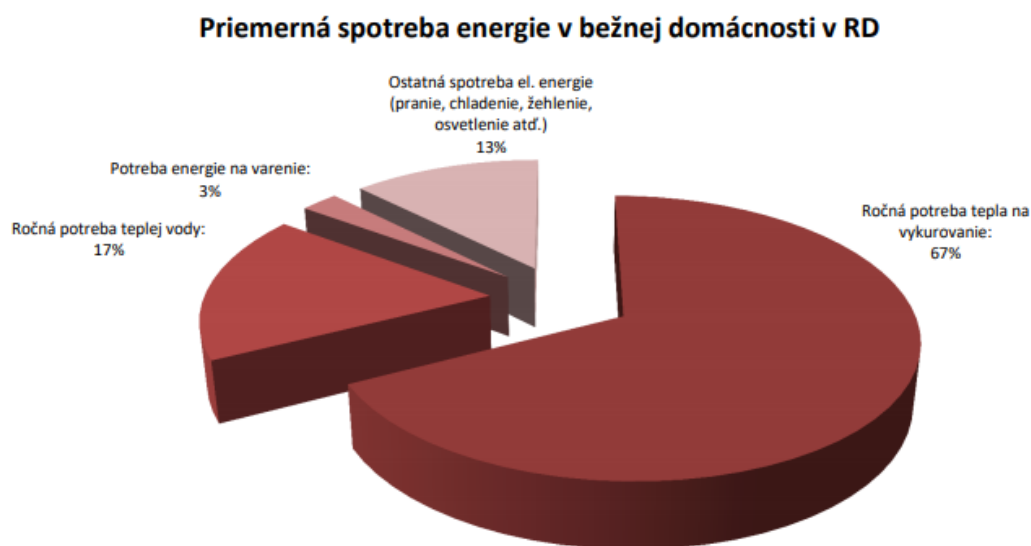
Ročná spotreba elektrickej energie budov závisí, akým spôsobom nakladajú s energiami a na čo sú budovy určené. Veľmi záleží na spôsobe vykurovania, v prípade elektrického spôsobu vykurovania sa dá predpokladať zvýšená spotreba elektrickej energie.

Spotreba elektrickej energie medzi domácnosťou so starším vybavením a novším vybavením je tiež v značnej miere odlišná a podľa zdroja [47] môže vyzeráť nasledovne.

Tab. 1.1 Percentuálny rozdiel v spotrebovanej elektrickej energii medzi starším a novším vybavením domu [47]

Staršia domácnosť	Novšia domácnosť
Chladnička 26%	Elektronika (PC, TV...) 21%
Osvetlenie 20%	Varenie 18%
Varenie 14%	Chladnička 12%
Elektronika 13%	Práčka 11%
Práčka 11%	Umývačka riadu 9%
Žehlička 8%	Klimatizácia 9%
Vysávač 8%	Osvetlenie 5%
Ostatné 2%	Ostatné 3%

Rozdelenie foriem energií spotrebovaných v bežnej domácnosti rodinného domu je v rôznych formách uvedené zhruba takto, podľa zdroja [48]



Obr. 1.2 Rozdelenie energií spotrebovaných v bežnej domácnosti podľa ich foriem a využitia [48]

Pri spotrebe elektrickej energie v budovách teda záleží, v koľkých spotrebičoch elektrickú energiu budova premieňa na iné formy dané rozdelením na obr. 1.2. Zdroj [49] uvádza priemernú ročnú spotrebu elektrickej energie domácností, podľa toho v koľkých spotrebičoch sa premieňa nasledovne.

Tab. 1.2 Priemerné ročné spotreby elektrickej energie v rôznych typoch domácností [49]

Typ domácnosti	Priemerná spotreba [kWh]
Bez elektrického vykurovania a bez ohrevu teplej úžitkovej vody (TUV)	823-2297
S elektrickým vykurovaním a s ohrevom teplej úžitkovej vody (TUV)	3884-6215
S priamo výhrevným vykurovaním	8923

Ako je vidieť z tab. 1.2, priemerné spotreby domácností s rovnakým typom energetického zásobovania sú uvádzané v intervaloch, veľmi teda záleží, akým spôsobom sa energia v domácnostiach šetrí a spotrebúva a líši sa prípad od prípadu.

1.2 Výroba elektrickej energie v domácnostiach

Princípy výroby elektrickej energie v domácnostiach sú odlišné od veľkých tradičných zdrojov. Energiu v takto malej miere nie je možné vyrábať hospodárne, ekonomicky ani ekologicky pri vzore tradičných spôsobov získavania elektrickej energie (spaľovanie uhlia, plynu, jadrové zdroje). Pre výrobu elektrickej energie pre domácnosti sa dajú s výhodou použiť solárne alebo veterné zdroje. [46] Svojimi vlastnosťami sú vhodné aj do malej miery teda do takzvanej mikroenergetiky. Rozhodne vedú hlavne kvôli tomu, že do ovzdušia nevypúšťajú škodlivé emisie ani nie sú nijako inak nebezpečné zo zdravotného hľadiska pri ich používaní.

Z ekonomického hľadiska sa hneď vylučuje použitie elektrického agregátu ako zdroja energie pre domácnosti, jeho počiatkové náklady sú enormne vysoké a tiež náklady na palivo určite nie sú zanedbateľné, tento zdroj sa najviac hodí ako záložný zdroj v prípade výpadku energie pre veľmi dôležité pracoviská ako sú napríklad nemocnice.

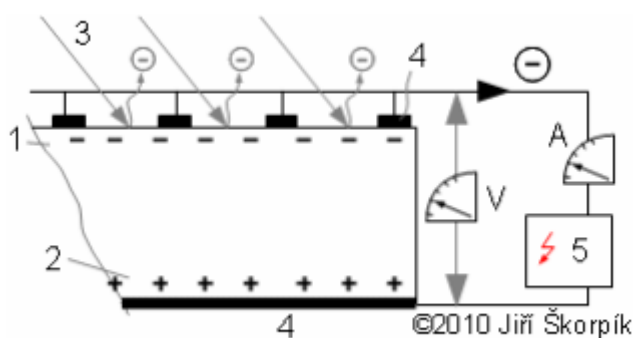
Tiež sa vylučujú zdroje energie pracujúce na tepelných obehoch, keďže predmetom záujmu je zdroj elektriny nie tepla, aj keď je pravdou, že v prípade domácností s elektrickým vykurovaním by použitie tejto technológie znížilo spotrebu elektriny.

Ďalšou možnosťou je použitie kombinovanej výroby tepla a elektriny pri použití kogeneračnej jednotky. Pri vhodnej konfigurácii a riadení dokáže kogeneračná jednotka dodávať energiu do siete, keď je dopyt po elektrickej energii v sieti najväčší a predávať tak túto energiu. Veľkou výhodou tejto technológie je to, že nie je závislá na premennom počasí a dokáže dodávať energiu keď je potrebná ako ukazuje napríklad obr. 1.1, teda ráno a podvečer, keď je potrebná ako elektrická energia tak aj teplo. Kogeneračná jednotka je však značne nákladná a tiež spaľuje kvalitné palivo, je viac vhodná pre viacero príbytkov (panelák, sídlisko...) a menej vhodná pre jednotlivé domácnosti. Táto technológia je zložitejšia a kogenerácia je kapitola sama o sebe, preto ju nebudem podrobne uvádzať a zameriam sa len na solárne a veterné zdroje ako najvhodnejšie zdroje elektriky pre domácnosti.

1.2.1 Fotovoltaické panely

Energiu zo slnka môžu budovy využiť viacerými spôsobmi. Pasívne- budovy sú postavené tak, aby sa cez okná pri slnečnom svite do budovy dostalo čo najväčšie množstvo tepla. Fototermické panely- zariadenie, ktoré sústreďuje slnečné lúče a zohrieva tak pracovnú tekutinu (teplú úžitkovú vodu). Fotovoltaické panely- zariadenie sprostredkujúce priamu premenu slnečnej energie na elektrickú energiu. [50] Všetky tieto zariadenia môžu v konečnom dôsledku ušetriť spotrebu elektrickej energie budovy. Viac predstavené však budú len fotovoltaické panely.

Fotovoltaický panel je tvorený z jednotlivých článkov. Jednotlivé články sú tvorené kremíkovou doštičkou, na vrchnej s spodnej strane je kremík obohatený rozdielnymi prísadami tak aby sa vytvoril polovodič typu PN (na jednej strane sa zhromažďuje + náboj, na druhej - náboj). Rozdiel el. nábojov na opačných stranách dosky vytvára veľmi slabé napätie. Pri dopade slnečného žiarenia na hornú vrstvu dôjde k fotoelektrickému javu teda k uvoľneniu elektrónov vo vrchnej vrstve, ktoré sú v dôsledku vytvoreného napätia odvádzané do spotrebiča pomocou zberných vodičov. Takýmto spôsobom vznikne elektrický obvod. [50]



Obr. 1.3 Schéma solárneho článku [50]

1- polovodič typu N, 2- polovodič typu P, 3- slnečné žiarenie, 4- zberné vodiče, 5- spotrebič

Ako je vidieť z obr. 1.3, elektrický prúd vytváraný na fotovoltaickom článku je jednosmerný, teda pred tým, než sa pripojí k bežným spotrebičom alebo sieti je nutné ho pomocou striedaču premeniť na striedavý prúd.

Účinnosť premeny energie v fotovoltaickom článku sa teoreticky nachádza na hodnote 31%. V praxi je však účinnosť premeny zhruba 20% a s pribúdajúcim vekom článku klesá. Životnosť panelu môže byť aj 25 rokov, kedy sa jeho účinnosť pohybuje okolo 6%. [50]

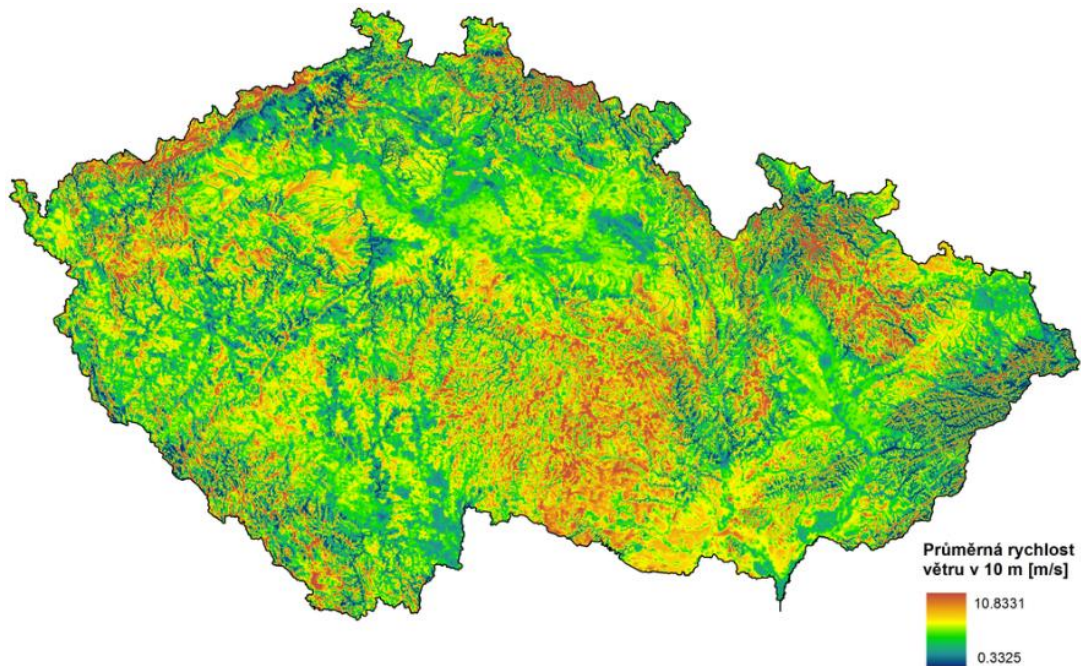
Výkon panelu samozrejme závisí na jeho ploche. Panel s rozmerom 1x1,6 m môže dosahovať výkon zhruba 300 W. Je však veľký rozdiel v tom ako výrobcovia uvádzajú výkon týchto panelov. Väčšinou uvádzajú výkon takzvaný vrcholový, teda keď slnečné žiarenie dopadá kolmo na panel a slnečný výkon je najväčší (v letných mesiacoch pri jasných dňoch). Táto hodnota môže byť dosť vzdialená od toho, aký výkon môže potom panel dosiahnuť v praxi na konkrétnom mieste v rámci celého roka.

Výkon panelu teda závisí na uhle dopadu slnečného žiarenia, preto sa v niektorých prípadoch používajú mechanizmy, ktoré panel natáčajú tak aby bol tento uhol vždy dodržaný. Samozrejme to zbytočne predražuje dané zariadenie.

1.2.2 Malé větrné turbíny

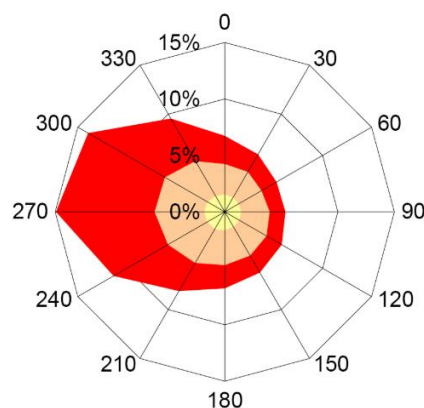
Keďže malým větrným elektrárnám sa bude venovať celá práca, bude táto podkapitola veľmi stručná.

Větrná turbína transformuje kinetickú energiu vetra na prácu rotoru pomocou špeciálne tvarovaných profilov. Pro obtekanie profilu je na profil vyvodzovaná na sila od vetra a prebieha tak premena energie. Najväčší vplyv na výkon veternej turbíny má rýchlosť vetra. Oblasť centrálnej Európy je však ohľadne veterného potenciálu chudobná.



Obr. 1.4 Větrná situácia v Českej Republike vo výške 10 m nad povrchom [21]

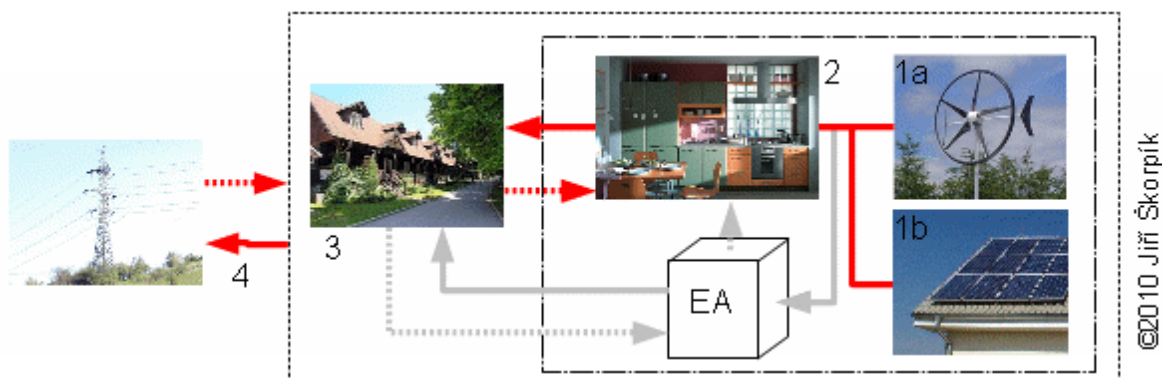
Čo sa smeru týka, v centrálnej Európe drvivou väčšinou prevládajú vetry smerujúce zo západu na východ, čo znázorňuje aj smerová ružica vetru, ktorá ukazuje početnosť výskytu vetrov vzhľadom na ich smer.



Obr. 1.5 Smerová ružica vetru typická pre Českú Republiku [21]

Výstupom veternej turbíny môže byť jednosmerný prúd ako aj striedavý prúd, záleží na type použitého generátoru a na type zapojenia veternej elektrárne. Pre mestské prostredia dáva veľký zmysel kombinácia veternej turbíny a solárnych panelov, pretože sa pri tejto

kombinácii môže použiť podobná elektronika na reguláciu a na napojenie výstupov do siete, čo vedie k zjednodušeniu celého systému oproti prípadu, kedy by pracovala veterná turbína a panel samostatne. V niektorých prípadoch zapojenia dáva zmysel použitie akumulátora elektrickej energie. Najvýhodnejším typom zapojenia je však použitie akumulátora aj napojenia na verejnú sieť. [46]



Obr. 1.6 Zapojenie systému fotovoltaika-vietor na nadväzujúce rozvody [46]
EA- elektrický akumulátor, 1- elektrárň, 2- domácnosť, 3- okolie (susedstvo), 4- prenosová sústava

Systém uchovávania a prenosu energie je samozrejme zložitejší než to ukazuje obr. 1.6, nie je však predmetom práce vyhodnocovať hospodárnosť a použitie tohto systému, niečo viac o danom systéme ako aj o vetre a veterných turbínach však bude podávané aj v nasledujúcich kapitolách.

1.3 Akumulácia energie a riadenie toku energií v domácnostiach

Cieľom akumulácie je uložiť si vyrobenú energiu v čase keď výroba preyšuje spotrebu na časy, kedy spotreba preyšuje výrobu, takýmto spôsobom dochádza k šetreniu elektrickej energie. Akumulácia energie v domácnostiach môže mať viacero foriem. Pre akumuláciu elektrickej energie vyrobenej z domácej elektrárne sa bežne používajú veľké Li-Ionové batérie, prípadne sa dá použiť séria autobatérií. Finančne sú však veľmi nákladné a tiež ich životnosť nie je neobmedzená. Problémy spojené s likvidáciou vyradených batérií sú značné a v dnešnej dobe, kedy veľmi veľa elektrických spotrebičov obsahuje tieto batérie sa tento problém veľmi ľahko môže výrazne prejaviť až v budúcnosti. Vývoj však ide dopredu a pracuje sa aj na iných princípom akumulácie elektrickej energie.

Účinnosť elektrickej akumulácie môže byť až 92%. Pre malé domáce elektrárne dáva zmysel batéria o kapacite maximálne niekoľko kWh. [46]

Ako ukazuje obr. 1.1, výroba energie z domácej elektrárne vzhľadom na priebeh dňa je odlišná so spotrebou domácnosti, preto je nutná akumulácia, prípadne je nutné prebytky elektriny dodávať do siete. Problém nadbytku elektrickej energie pri slnečných a veterných dňoch kedy je spotreba energie nižšia ako jej výroba je stále aktuálnejší. Prebytky elektrickej energie je možné použiť v prečerpávacích elektrárnach, tie sú však značne geograficky obmedzené a slúžia hlavne ako akumulácia prebytkov energie z jadrových elektrární. Niektoré teplárne zareagovali na tento aktuálny problém kúpou elektrických kotlov a pri prebytkoch lacnej energie zohrievajú vodu, ktorú neskôr distribuujú ako teplú úžitkovú vodu,

akumulácie energie do tepla je totiž mnohonásobne najlacnejší spôsob akumulácie energie. Pracuje sa tiež na technológiách tepelnej akumulácie elektrárne založenej na stlačenom vzduchu. [46]

Jedným z veľmi výhodných systémov akumulácie je takzvaný systém virtuálnej batérie, kedy sa prebytky energie distribuujú do siete, pričom sa množstvo týchto prebytkov meria a pri potrebe domácnosti sa potom tok energie zmení a túto energiu dostáva domácnosť naspäť buď zadarmo s veľmi zvýhodnenou cenou. Takéto riešenie však rieši len problém prebytku v domácnosti a nie problém prebytkov celkovo.

Je jasné, že akumulácia energie je v dnešnej podobe energetiky významná a určite bude mať aj v budúcnosti veľkú rolu. Akumulácia energie do batérií však momentálne nie je úplne najekonomickejšie a najekologickejšie riešenie.

Cieľom domácich elektrární je jednoznačne šetrenie, síce sa šetrí množstvo elektrickej energie prichádzajúcej do domácnosti v konečnom dôsledku sa takýmto spôsobom šetrí peniaze. Pre maximalizovanie úspor je vhodné použitie riadiaceho systému. Podľa obr. 1.6 je vidieť, že toky energií môžu mať z elektrární rôzne smery. Riadiace systémy odhadujú spotrebu tepla a elektriny podľa predpovede počasia, teda odhadujú spotrebu energií pre nadchádzajúce obdobia. Na základe týchto predikcií sa v spolupráci s akumulátorom riadia toky energií z a do siete a spotrebičov. Napríklad dokáže naplánovať na presný deň a hodinu energetiky náročné činnosti akou je napríklad pranie, prípadne v prípade výhodnej ceny energie dobíjať akumulátor. [46]

Okrem akumulátorov a riadiaceho systému je v malej domácej elektrárni použiť aj inú elektroniku za cieľom regulácie, usmernenia a transformácie prúdu a napätia tak aby bolo celé zapojenie čo najvýhodnejšie. Systém malých elektrární ale ešte nie je natoľko autonómny a výkonný, že je nutné pripojenie k verejnej sieti za cieľom zdieľania elektrickej energie. O tom ale v ďalších kapitolách.

1.4 Výhody a nevýhody decentralizovanej výroby elektriny

Výroba energie pre sebestačnosť domácností sa dá označovať ako decentralizovaná výroba energie (mikrogenerácia), teda presun výroby z veľkých energetických centráľ na menšie a početnejšie výrobné. Takýto presun má samozrejme aj svoje výhody a nevýhody, názory sa líšia a neexistuje presná odpoveď, aký typ výroby energie je najlepší. Svet však určite speje k väčšej decentralizácii výroby, uvidí sa kde až sa tento posuv zastaví a či vôbec.

Tab. 1.3 Porovnanie decentralizovanej a centralizovanej výroby energie [51]

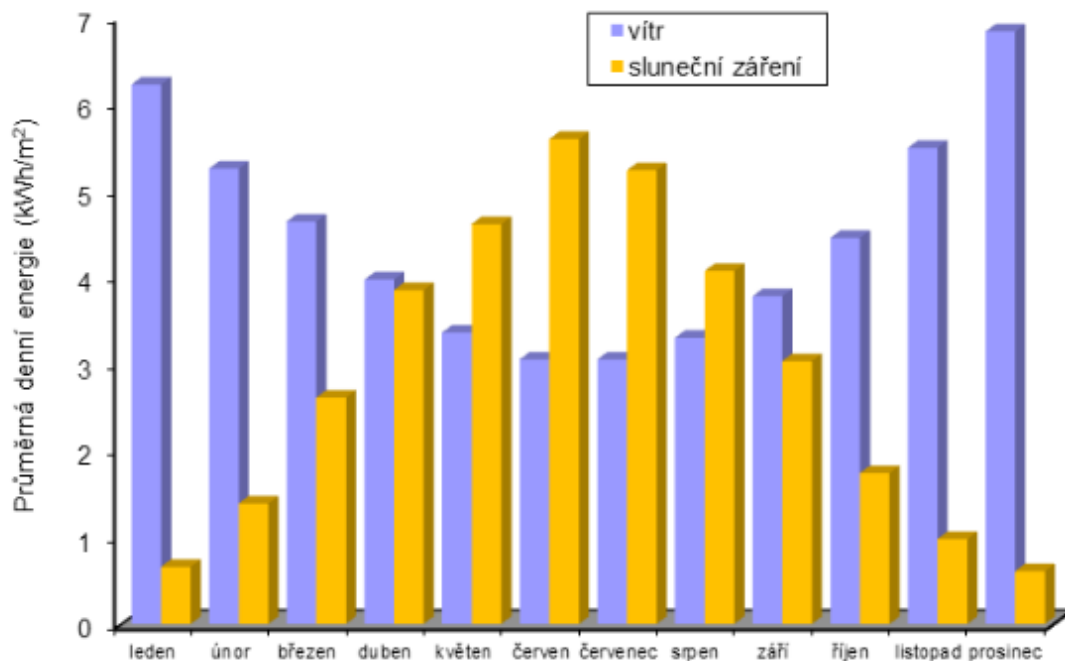
	Decentralizované zdroje	Centralizované zdroje
Využitie odpadného tepla pri výrobe energie	Dá sa využiť v prípade kogeneračnej jednotky. V prípade solárnych panelov a veterných turbín však významné množstvo odpadného tepla nevzniká	Dá sa využiť napríklad na ohrev TUV, vykurovanie, prípadne v napojení na iné technológie, inak by sa teplo odvádzalo inak a nijak by sa nevyužilo
Straty prenosom	Pri priamom napájaní z elektrárne na streche do domácnosti sa takmer dajú zanedbať	Môžu v prenosovej sústave od elektrárne k spotrebiteľovi predstavovať až 6-8% z pôvodného výkonu

Zmeny v sieti	Redukuje nároky na distribučnú sieť a teda ju zbytočne nezaťažuje a nie je tak potrebné zvyšovať kapacitu prenosovej siete	Pri zvyšovaní prenášaného výkonu zaťažuje tiež distribučnú sieť, ktorej kapacita sa musí zvýšiť
Porucha distribučnej siete	Neovplyvní distribúciu zo zdroja k spotrebiteľovi	Preruší dodávku energie zo zdroja k spotrebiteľovi
Možnosť voľnosti odberateľa pri výbere technológie	Zákazník si môže vybrať, akou technológiou chce zásobiť svoju domácnosť (solárny systém, veterná turbína, kogeneračná jednotka...)	Zákazník si môže vybrať len dodávateľa energie, nie technológiu ktorou sa vyrába, keď už je raz energia v sieti, už sa nedá zistiť jej pôvod
Spôľahlivosť a nároky na údržbu	Fotovoltaika je zvyčajne veľmi spoľahlivý zdroj energie. Veterná turbína je vystavená vonkajším vplyvom viac, môže sa však tiež považovať za spoľahlivý zdroj z hľadiska porúch a opráv. Kogeneračná jednotka si vyžaduje pravidelné servisné prehliadky. Veľkú nespoľahlivosť však majú zdroje spoliehajúce sa na počasie (slnko, vietor), nikto nedokáže zaručiť priebeh počasia, preto je tento zdroj značne premenný.	Dodávka energie do siete býva zvyčajne veľmi spoľahlivá. Jednotlivé energetické celky si však vyžadujú servisné prehliadky a renovácie. Sú však schopné vydržať v provoze dekády.
Schopnosť pokryť spotrebu domácností	Zvyčajne nedokážu pokryť celú spotrebu domu. Sú mienené ako doplnok. Pri istých aplikáciách sa však energetická sebestačnosť dokáže zaistiť.	Bez problémov pokryjú spotrebu domácností.
Ekonomika	Najväčšou položkou pri mikrogenerácii je generátor elektrického prúdu, ktorý tvorí väčšinu ceny technológií. Pri masovej produkcii sa však môže dosiahnuť dobrá návratnosť. Inak však tieto systémy bez dotácií a príspevkov ekonomicky príliš dobre nevychádzajú.	Tento typ zdroja energie je najviac ekonomický vzhľadom na množstvo poskytovaného výkonu a ceny palív.

Ako ukazuje tabuľka 1.3, nie je úplne jasne rozoznateľné, ktorá z typov výroby energie má viac výhod ako nevýhod. Záleží však aj na iných aspektoch, ktoré tab. 1.3 nezahrňuje, ako je napríklad šetrenie primárnych zdrojov energie (uhlie, ropa, plyn) pri použití obnoviteľných zdrojov energie (fotovoltaika, vietor...).

1.5 Kombinácia slnečnej a veternej energie

Už bolo zmienené, že slnečná energetika ako aj veterná energetika je veľmi premenlivá. Ako bude ešte zmienené, vietor vzniká pri pôsobení slnečného žiarenia. Platí však, že vietor fúka len keď sú slnečné dni v danej lokalite? Čo hovorí konkrétne pozorovania počasia v realite? Obr. 1.7 ukazuje priebeh potencionálnych energetických výťažkov vzťahnutých na jednotku plochy pre oblasti mierneho klimatického pásma (konkrétny priebeh bol získaný z meraní v južnom Anglicku, jedná sa však o oblasť mierneho klimatického pásma a tak sa dá v centrálnej Európe predpokladať tvarovo podobný priebeh).



Obr. 1.7 Mesačné priemery strednej dennej energie solárneho žiarenia a vetra [52]

Ako je vidieť z obrázku 1.7, energia zo slnečného žiarenia a energia vetra idú takmer proti sebe aj keď je vietor priamym dôsledkom slnečného žiarenia. Ukazuje to na fakt, že využiteľný vietor je daný globálnejším charakterom počasia nie lokálnymi cirkulačnými systémami, ktoré vzniknú pri slnečnom žiarení v danej lokalite. Veterné počasie u nás ovplyvňuje vo veľkej miere prechod tlakových výší a níží vzniknutých nad Atlantickým oceánom a tento vietor je hlavným zdrojom energie pre veterné turbíny.

Z obr. 1.7 sa tiež dá vyčítať, že energetický systém fotovoltaika-vietor bude oveľa spoľahlivejší ako jednotlivé systémy pracujúce samostatne a teda takýto systém dokáže napájať domácnosti počas celého roka.

1.6 Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 1

- Spotreba energií domácností je počas dňa premenná a najväčšiu časť spotreby domácností tvorí teplo.
- Pre budovy v obývaných oblastiach pripadajú v úvahu ako zdroje elektrickej energie solárne panely, veterné turbíny prípadne aj kogeneračné jednotky. Iné technológie sa v takto zmenšenom stave nedajú efektívne použiť.
- Z premenného charakteru energetických výnosov zo slnka a vetra je nutné pri vytváraní systému elektrárne myslieť na akumuláciu energie a aj na efektívne riadenie tokov do a z domácností, pretože len takto môže mať takýto systém ekonomický zmysel.
- Pri používaní malých elektrární inštalovaných vo väčšom množstve sa zdroje energie decentralizujú. Takýto prístup však v niektorých okruhoch vyvoláva vlnu kritiky, je však na uvážení do budúcnosti a aj rozvoji technológií, či je decentralizácia zdrojov vhodná alebo nie. Ideálny systém zdrojov energie bude pravdepodobne pozostávať v kombinácii centralizovaných a decentralizovaných zdrojoch.
- Ako ideálny systém zdroja energie sa javí v kombinácii fotovoltaika-vietor, pretože by mal pravdepodobne využitie počas celého roka. Takýto systém však nemá za cieľ vytvoriť z domácností energeticky sebestačné jednotky. Podstatnejšiu časť z energetických ziskoch systému by mal tvoriť zisk z fotovoltaiky, veterná turbína, kvôli bezpečnosti nemôže byť enormne veľká a mala by byť v systéme len ako doplnok.

2 Vietor

Na začiatku práce je vhodné si vysvetliť a definovať všetky pojmy a zákonitosti, ktoré sa v práci objavia. Úvodná kapitola práce sa teda zameria na vietor ako taký. Bude pojednávať o jeho energii a tiež o jeho charakteristikách. Taktiež bude vysvetlený vznik vetru.

2.1 Pôvod energie vetra a jej podiel na celkovej energii Zeme

Všetka energia prichádzajúca na Zem má svoj pôvod v slnečnom žiarení (teple), okrem toho ešte Zem ovplyvňuje Mesiac ktorý vytvára príliv a odliv. Celková energia slnkom do vesmíru vyžiarená je zhruba $12,54 \cdot 10^{30}$ kJ/rok. Z tejto energie naša planéta aj so svojim vzdušným obalom pohltí zhruba $5,5 \cdot 10^{21}$ kJ/rok. Podľa zdroja [1] je rozdelenie energie ukrytej v rôznych nositeľoch na Zemi nasledovné:

Tab. 2.1 rozdelenie energie na Zemi podľa jej nositeľov [1]

Forma energie	Množstvo
Celková energia slnkom vyžiarená	$12,54 \cdot 10^{30}$ kJ/rok
Časť energie, ktorú pohltí Zem a jej vzdušný obal	$5560 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia pohltená samotnou Zemou	$2215 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia k odpareniu vody z morí a zo vzduchu	$1421 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia vzdušného prúdenia	$137 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia vodných kvapiek v oblakoch	$117 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia ukrytá v rastlinách	$0,67 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia vodných tokov	$0,23 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia v uhlí, ktoré sa ročne spotrebuje	$0,02 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia v zásobách uhlia celkovo	$183 \cdot 10^{18}$ kJ/rok
Energia v zásobách nafty celkovo	$0,42 \cdot 10^{18}$ kJ/rok

Spomínané údaje pochádzajú zo zdroja z roku 1925 a sú len istým odhadmi. Novšie zdroje informácií [39] podávajú zhruba podobné čísla, líšia sa len veľmi málo, neudávajú však rozdelenie energie na Zemi podľa jej nositeľov tak ako to uvádza zdroj [1]. Dnes už čísla nemusia úplne sedieť s tými v tab. 2.1. Dávajú však akýsi náhľad a predstavu do množstva energie skrytej v rôznych podobách na Zemi.

Energia, našou zemeguľou zo slnečného žiarenia pohltená je $1,54 \cdot 10^{18}$ kWh ročne. Z toho sa 97,5% mení v teplo a svetlo, 2,5% sa mení v pohybovú energiu vetra. Z celkovej pohltenej energie sa 58% dostane do atmosféry, z toho 15% atmosféra absorbuje priamo a 43% sa vyžiari ako dlhovlnné tepelné žiarenie (z povrchu Zeme do atmosféry).[2]

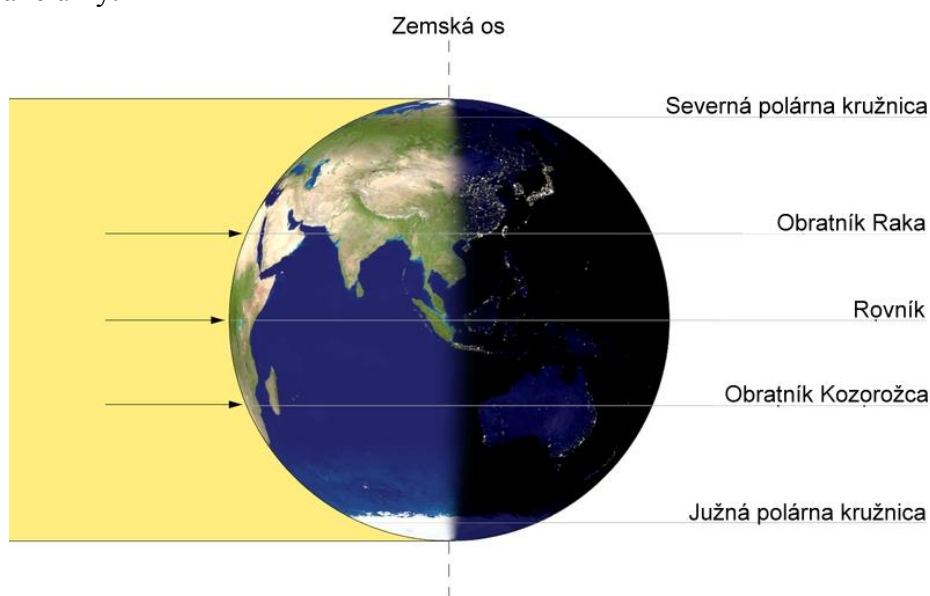
Vnútrotným trením vzduchových častíc, pohybujúcich sa rôznou rýchlosťou o seba a ich trením o Zemský povrch vzniká teplo, a táto tepelná energia sa späť vyžiari do priestoru. Energia potrebná k udržaniu pohybu atmosféry, teda energia vynahrádzajúca straty trením sa odhaduje na 2% energie prijatej vzdušným obalom Zeme z energie slnečného žiarenia. Zbytok, teda 98% sa premení na vnútrotnú energiu atmosféry, mení sa teda na teplo a svetlo a dlhovlnným žiarením sa vyžaruje späť do vesmíru. [2] Pričom by malo platiť, že energia prijatá Zemou by mala byť v rovnováhe s energiou Zemou vyžiarenou, ukazuje sa, že tieto energie nemusia byť zrovna v rovnováhe a tento jav je nazývaný ako globálne otepľovanie. [39]

Je však nutné poznamenať, že sice je energia vetra veľká, jej úplné využitie nie je možné, keďže vysoké rýchlosti vzduchu sa nachádzajú v značnej vzdialenosti od povrchu Zeme a to môže byť výška až niekoľko kilometrov. Pre nás sú ale dosiahnuteľné a využiteľné pohyby vzduchu len do výšky pár stoviek metrov maximálne, v takejto výške sa však vzduch nepohybuje tak rýchlo. Predmetom práce sú malé veterné turbíny, ich výška od povrchu sa pohybuje v jednotkách maximálne desiatkach metrov (pokiaľ sú uložené na strechách budov). V takýchto výškach je rýchlosť vetra vysoko ovplyvnená povrchom Zeme. Tejto vrstve prúdenia sa hovorí medzná vrstva a prúdenie je tu ovplyvnené trením o povrch, ale aj turbulenciami spôsobenými prekážkami na povrchu. Množstvo energie vzťahnuté na túto vrstvu nedosahuje ani zďaleka hodnôt, ktoré má pohybujúci sa vzduch vo výškach niekoľko kilometrov. Pohyby vzduchu v nízkych výškach sú ale pre nás veľmi ľahko dosiahnuteľné a spracovateľné.

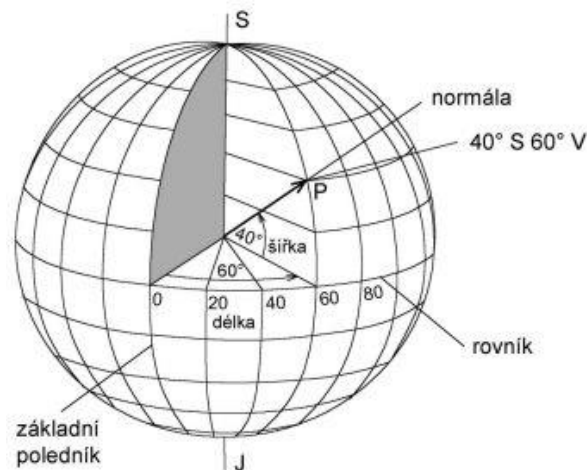
2.2 Vznik vetra

Keby si predstavíme našu planétu ako rovnú hladkú dosku vystavenú slnečnému žiareniu po celej ploche rovnomerne, zohrievalo by toto slnečné žiarenie každé miesto plochy rovnako. Vzduch by sa nad touto plochou zohrieval tiež rovnomerne po celom objeme (pri zanedbaní krajov dosky). Potom by bola v rovnakých výškach rovnaká teplota vzduchu a tiež rovnaký hydrostatický tlak. To by znamenalo, že nastala statická rovnováha a premiestňovanie vzduchu by nenastalo.

Zem však nie je plochá doska, a už vôbec nie hladká. Z celkového pohľadu na planétu sú niektoré povrchy slnečnému žiareniu vystavené priamejšie než ostatné. Záleží na období v roku, vtedy sa mení miesto na Zemi, kde slnečné lúče dopadajú kolmo a teda pri rôznych obdobiach v roku je iný uhol dopadu lúčov vzhľadom na jedno pevné miesto (deklinácia Slnka). Tiež záleží na zemepisnej šírke, pri ktorej sa mení uhol dopadu lúčov vzhľadom na rôzne miesta zemského povrchu. Uhol dopadu lúčov vzhľadom na jedno pevné miesto v neposlednej rade záleží aj od hodinového uhla. Výška slnka nad povrchom zahŕňa všetky tri spomínané uhly.



Obr. 2.1 Poloha Slnka a Zeme pri rovnodennosti, kedy je uhol deklinácie 0° . [3]

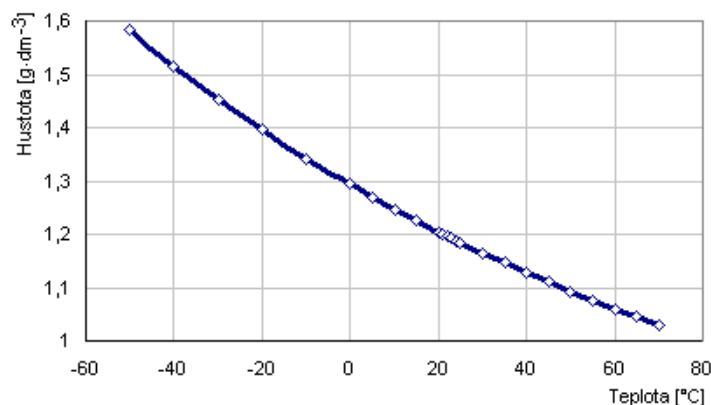


Obr. 2.2 Uhol zemepisnej šírky. [4]

Zložka slnečného žiarenia H_{slnko} [W/m^2] dopadajúceho na jednotku plochy v mieste, kde je výška slnka h_{slnko} [$^\circ$], deklinácia Slnka δ [$^\circ$], zemepisná šírka φ_z [$^\circ$] a hodinový uhol τ [$^\circ$], (0° pre 12 hodín) podľa [5], bude:

$$H_{slnko} = I_0 \cdot \sin h_{slnko} = I_0 \cdot (\sin \delta \cdot \sin \varphi_z + \cos \delta \cdot \cos \varphi_z \cdot \cos \tau) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2.1)$$

kde I_0 [W/m^2] je solárna konštanta. Kde bude menšia zložka slnečného žiarenia H_{slnko} , bude aj menšia teplota nad povrchom, keďže vzduch sa okrem zohrievaním priamym slnečným žiarením (rovnorné prehrievanie) zohrieva aj od zemského povrchu (nerovnomerné prehrievanie). Z daného vzťahu je vidieť, že hodnota H_{slnko} bude najvyššia pre miesta, kde je $\varphi=0^\circ$, teda na rovníku a smerom k pólom sa bude táto zložka zmenšovať. To isté platí aj pre teploty, ktoré sa smerom od rovníka smerom k pólom zmenšujú. Rôzne teploty nad povrchom znamenajú aj rôzne hustoty vzduchu.



Obr. 2.3 Závislosť hustoty vzduchu na teplote [12]

Týmito rozdielmi teplôt a rozdielmi hustôt vzniká aj rozdiel hydrostatických tlakov vo vodorovnom smere, rovnováha v tomto smere je porušená a nastáva pohyb vzduchových hmôt teda vietor.

Vietor teda v globálnej mierke a pri istom zjednodušení bude mať smer pri zemi od pólom ku rovníku (pasát), v oblasti rovníkovej stúpa teplý vzduch smerom hore (vplyvom vztlakových síl) a v istej výške mení smer a vanie späť k pólom (antipasát) tam znova padá k povrchu, vytvára sa tak cirkulačný systém (podobné systémy sa vytvárajú aj v menšej mierke).

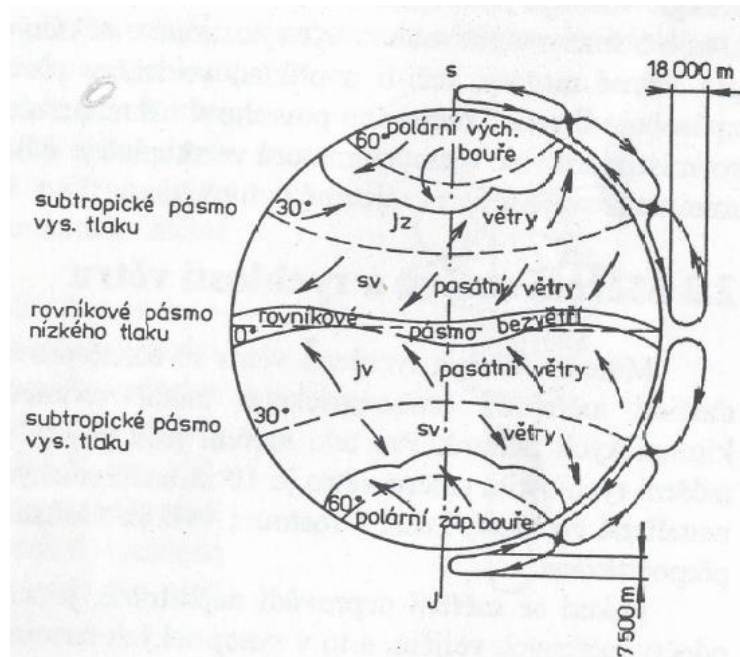
V globálnej mierke vzniká vietor tam (pasáty, antipasáty), kde je rôzna výška slnka, uhol deklinácie a uhol zemepisnej šírky. Okrem toho sú kľúčovými faktormi pri vzniku vetra nerovnomerné zahrievanie vzduchu slnečným žiarením (od povrchov a od atmosféry samotnej), striedanie teplôt (deň-noc), tepelný rozdiel medzi morom a pevninou, horami a dolinami... Vzniká teda aj v miestnej mierke v členitom a zastavanom teréne.

Je tiež dôležité poznamenať, že nadmorská výška nemá na vznik vetra vplyv, pretože v rovnakej výške nad zemou je vždy z hľadiska tlaku rovnaká hustota a teda nevzniká horizontálny tlakový gradient.

2.3 Hlavné a pravidelné pohyby vzduchu na Zemi

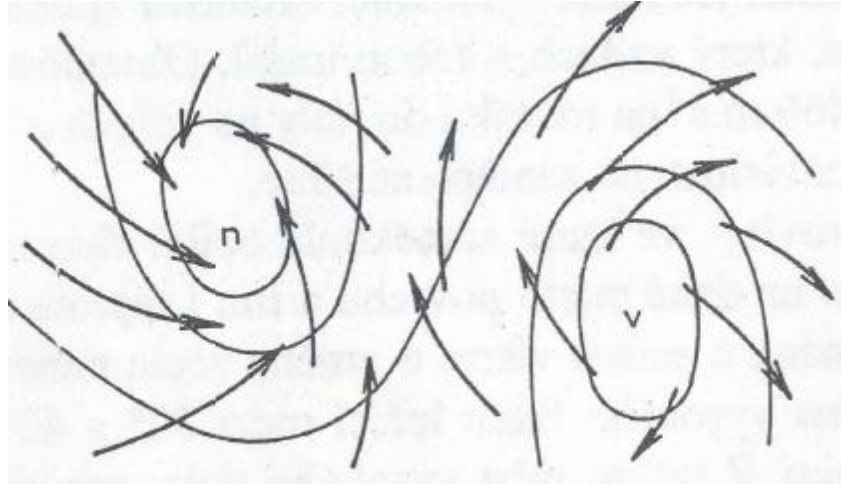
Pretože je zemská osa odklonená o $23,5^\circ$ od roviny, v ktorej obieha okolo slnka, mení sa v priebehu roku množstvo tepla dopadajúceho na povrch a tým aj teplota vzduchu, jeho hustota a teda aj jeho prúdenie. Prúdenie vzduchu tiež ovplyvňuje nerovnomerné ohrievanie oceánov, ich rozloženie, rozloženie pevniny ale aj reliéf pevniny. Po uvážení týchto nedokonalostí sa dajú v priemere označiť dve pásma s vysokým tlakom vzduchu medzi 30° a 40° zemskej šírky. [6] Z týchto miest vysokého tlaku vzduch prúdi na oba smery ku rovníku a k pólom.

Aby sme mali predstavu o celkovom pohybe vzduchu musíme uvažovať aj rotáciu Zeme, teda jej obvodovú rýchlosť, ktorá sa mení od 460 m/s na rovníku po 0 m/s presne na ose rotácie. [6] Pri pohybe vzduchu z tlakových výší má vzduch istú absolútnu rýchlosť, ktorá nesúvisí s rotáciou Zeme (zjednodušene). Zem má tiež obvodovú rýchlosť, ktorá nezáleží na rýchlosti vetra. Ak sa tieto dve rýchlosti vektorovo odčítajú, vznikne relatívna rýchlosť vetra, ktorú pocíti každý človek stojaci v danom mieste na povrchu. Keďže je obvodová rýchlosť Zeme v každom mieste zemepisnej šírky iná, bude iná aj relatívna rýchlosť vetra, teda bude mať inú veľkosť a smer. Takýmto spôsobom sa vietor smerom z tlakových výší do tlakových níží postupne čoraz viac stáča. Vietor teda nevanie jednoducho od pólom k rovníku vplyvom rotácie Zeme, rozdielnym a nerovnomerným zložením zemského povrchu.



Obr. 2.4 Schéma hlavných smerov vetru na zemeguli [6]

Oblasti vysokého a nízkého tlaku vzduchu ale nie sú stále, v priebehu roku sa ich poloha môže zmeniť. Dochádza k deformáciám týchto oblastí spôsobeným občasným pohybom obrovských hmôt studeného vzduchu od pólu k rovníku. Tieto nedokonalosti a deformácie má vzduchu výrazne ovplyvňujú počasie aj u nás (napríklad vietor pri tlakovej níži, kedy je obloha zatiahnutá).

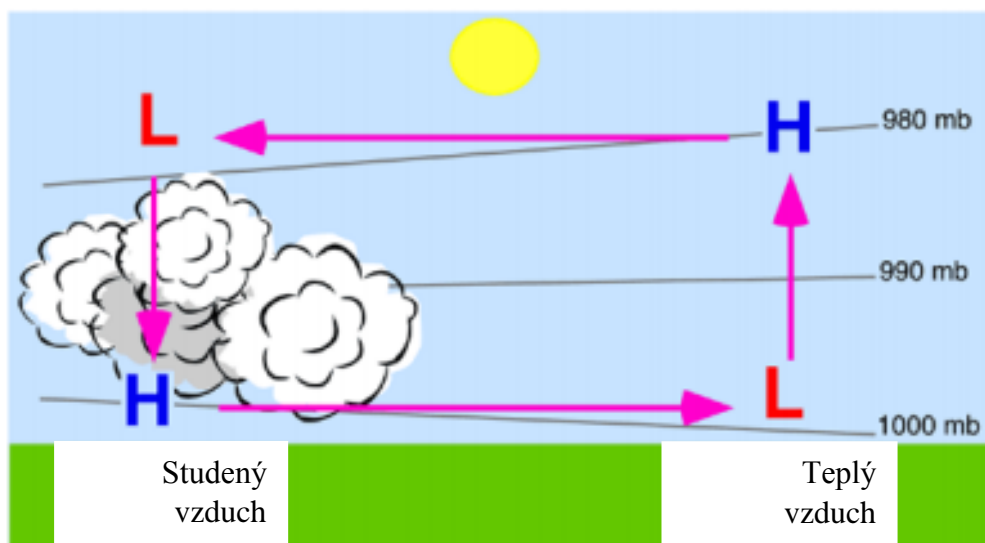


Obr. 2.5 Schéma prúdenia medzi tlakovou výšou a nížou na severnej pologuli [6]

Vplyvom trenia o zemský povrch a miestnych ohrevov v nižších výškach sa tieto pohyby vzduchu výrazne neprejavajú vo výškach pod 500 m (veľkosť a smer). Vetry v blízkosti povrchu vo výške 30 až 60 m, sú hlavne ovplyvnené reliéfom oblasti, kvalitou zemského povrchu a inými vplyvmi, ktoré budú neskôr vysvetlené.

2.3.1 Iné menšie pravidelné pohyby vzduchu

Okrem pravidelných pasátov a antipasátov môže vietor vznikáť aj v oveľa menšej mierke a dokonca byť stále pravidelný. Ide hlavne o miestne cirkulačné systémy, ktorých vznik je popísaný v kapitole 2.2 (vznik vetra) ale aj o jednosmerné prúdenia.



Obr. 2.6 Schéma miestneho cirkulačného systému s vyznačenými izobarickými plochami [7]

Ako je z obrázku 2.6 vidieť, pri osvetlenom povrchu sa vzduch viac prehrieva, klesá jeho hustota, izobary sa od seba vzdávajú a hydrostatický nárast tlaku je pozvolnejší, to znamená, že pri jednotnej výške je pri osvetlenom povrchu nižší tlak ako pri neosvetlenom povrchu. Vzniká teda horizontálny tlakový gradient a sila z neho vyplývajúca rozpožbuje pri povrchu masu vzduchu smerom k osvetlenému povrchu. Z osvetleného povrchu zase vzduch stúpa smerom hore (vplyvom vztlakových síl) a v istej výške sa stáča nad neosvetlenú oblasť, neskôr znovu padá dole do neosvetlenej oblasti. Takýmto spôsobom sa vzduch v cirkulačnej slučke dopĺňa a cirkuluje. [7]

Miestne cirkulácie sú teda priamo vyvolané miestnymi podmienkami, ale hlavne slnečným žiarením.

Existuje veľa druhov miestnych vetrov, v nasledujúcom texte budú detailnejšie spomenuté len tie, ktoré výraznejšie ovplyvňujú veterné podmienky v našich oblastiach.

Brízová cirkulácia

Brízová cirkulácia sa vytvára na pobreží mora alebo veľkej vodnej plochy. Cez deň, keď svieti slnko sa pevnina zohrieva viac ako vodná plocha. Vzduch sa teda nerovnomerne zohrieva a v dôvodov popísaných v kapitole 2.2 vznikne vietor, ktorý má pri povrchu smer od vody na pevninu. Výstupnými prúdmi, zostupnými prúdmi spolu s prúdom vo výške, ktorý má smer od pevniny k vodnej ploche sa cirkulácia uzatvára. [7]

Po západe slnka sa pevnina radiačne ochladzuje (rýchlejšie ako voda) a tým sa ochladzuje aj vzduch ležiaci nad ňou. Teraz je situácia opačná a vzduch pri povrchu prúdi od pevniny k vodnej ploche.

Jazerný vánok je slabší ako morský. Záleží na ploche a hĺbke jazera, pretože plytké jazero sa prehreje rovnako ako pevnina. Pri morskom vánku a pri najvyššom rozdiely teplôt medzi vodou a povrchom môže tento vietor mať rýchlosť 6 m/s. [8]



Obr. 2.7 Satelitný snímok Michiganského jazera, kde je viditeľná do akej vzdialenosti bríza siahá. [8]

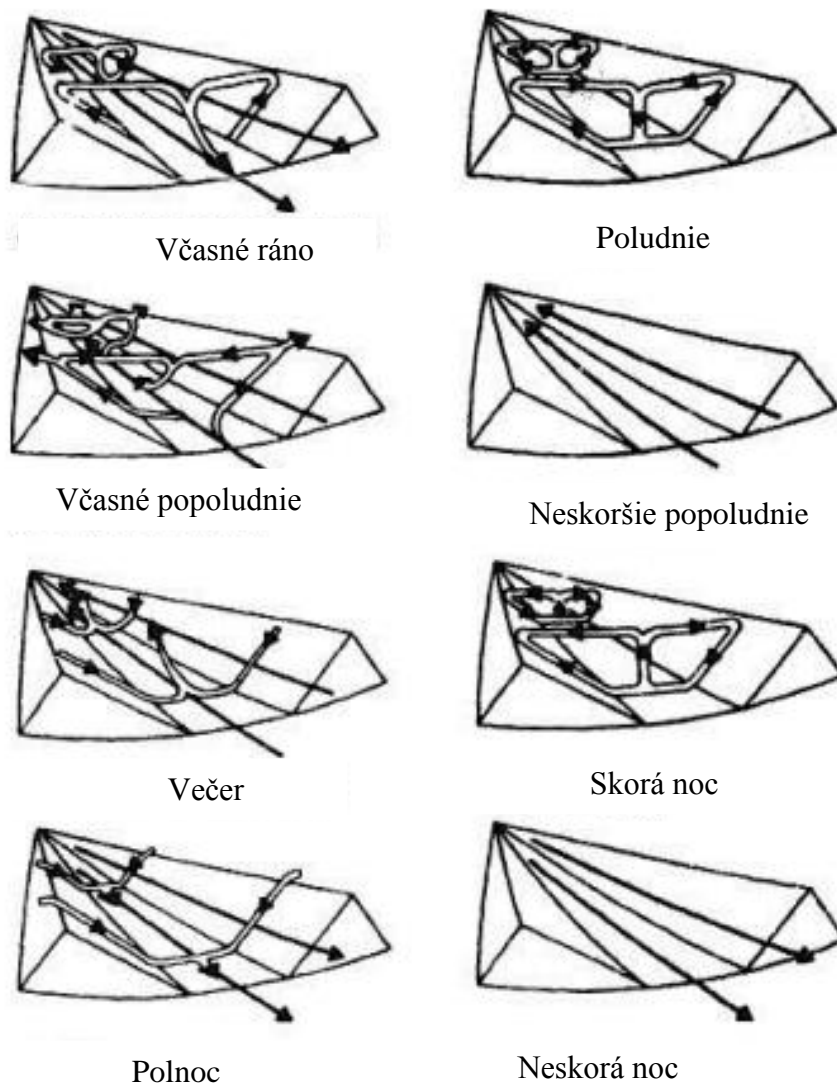
Horské, dolinové a svahové vetry

Táto skupina vetrov má rovnakú príčinu vzniku ako brízová cirkulácia, teda nerovnomerné ohrievanie susedných povrchov slnečným žiarením. Cirkulácia v týchto systémoch je zložitejšia, má dve zložky ktoré sa menia a navzájom sa ovplyvňujú.

Prvou zložkou je priečna zložka cirkulácie, je ňou svahový vietor. Svahy sa cez deň ohrievajú oveľa intenzívnejšie ako priľahlé oblasti, vzniká teda vietor, ktorý stúpa svahmi smerom nahor (cez deň, v noci je situácia opačná).

Druhou zložkou je pozdĺžna zložka cirkulácie, nazýva sa horský a dolinový vietor. Nastáva výmena vzduchu medzi dolinou a priľahlou rovinou. Vzduch v doline je ohrievaný od svahov a v istej výške je teplejší ako na rovine. V prízemnej vrstve vanie teda vietor z údolia na rovinu.

Podľa fázy dňa jedna alebo druhá zložka dominuje. Záleží tiež na kompozícii daného údolia, vďaka odchýlkam a rozdielom v každom údolí môže prúdenie vyzerat' inak. [7]

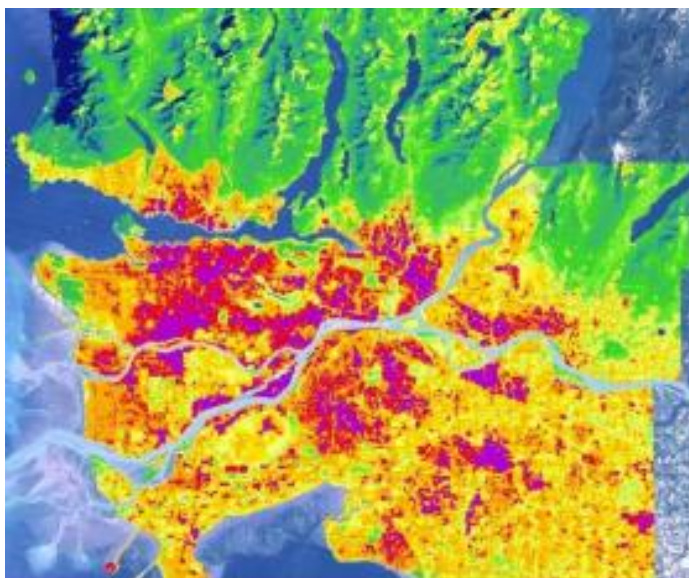


Obr. 2.8 Schéma prúdenia v údolí podľa fázy dňa, od skorého rána (a) po neskorú noc (b) [9]

Mestský vietor

V neposlednom rade, ako aj názov práce napovedá, mestský vietor bude najdôležitejším pravidelným vetrom vzhľadom na povahu tejto práce. Vzniká ako dôsledok takzvaného mestského tepelného ostrova, kedy je povrch mesta aspoň o 5°C teplejší ako jeho okolie. Mestá svojimi betónovými plochami vedú pohltiť veľké množstvo tepla, pretože slnečné žiarenie dobre pohlcujú a neodrážajú, tiež výroba a ľudská činnosť produkujú množstvo tepla. Okolie mesta väčšinou tvorí zeleň, ktorá absorbuje vlhkosť a dopadajúca energia je následne využitá na odparovanie vody. Preto je priemerná teplota v mestách o niekoľko stupňov vyššia ako je priemerná teplota mestského okolia. Ohrievaný vzduch nad mestami teda stúpa a dochádza k výstupným prúdom. Z okolia sa ako kompenzácia do mesta dostáva studenší vzduch zo všetkých strán. [10]

Zaujímavé tiež je, že hodnota rýchlosti vetru sa pohybuje v podobných číslach ako u brízovej cirkulácie alebo horského vetra ako uvádza zdroj [10], aj keď zdroje [18] a [19] uvádzajú iné čísla, zameriavajú sa však na poveternostné podmienky všeobecne, nie len na vplyv tepelného ostrova mesta.



Obr. 2.9 Povrchová teplota mesta Vancouver. (zelená- teplota do 24 °C, fialová- teplota nad 31 °C) [10]

Miestny vietor

Pod pojmom miestny vietor označujeme prúdenie vzduchu, ktoré je miestnymi podmienkami len ovplyvnené a jeho pôvod je globálneho charakteru (všeobecná cirkulácia atmosféry). Miestny vietor je teda len poruchou väčších a už existujúcich vetrov. Toto prúdenie je jednosmerné, nevytvára cirkulačný systém. Hlavným určujúcim faktorom je topografia povrchu. Vzduch je touto prekážkou urýchľovaný, spomaľovaný alebo sa menia jeho vlastnosti (vlhkosť). [10]

Okrem vyššie spomínaných typov miestnych vetrov existujú tiež pravidelné vetry ako: ľadovcový vietor, lesný vietor, fén, bóra, púštny vietor, vetry dýzového efektu. Ich vznik je však veľmi podobný ako vyššie popísané vetry a to nerovnomerným prehrievaným vzduchových hmôt, prípadne interakcia prúdenia vzduchu s prekážkou (pohorie), miešanie vlhkého a suchého vzduchu. [10]

Na koniec je potrebné spomenúť, že síce sa vyššie typy vetrov spomínajú ako pravidelné, ich pravidelnosť nemusí byť stopercentná. Každé pobrežie, každé údolie, mesto je iné a je tiež ovplyvňované rozsiahlejšími poveternostnými podmienkami. Preto sa nedá hovoriť úplne ako o pravidle. Jedno konkrétne miesto je ovplyvnené globálnymi vetrami ale aj mixom miestnych vetrov, ktoré navzájom interagujú a vytvárajú tak jedinečné podmienky pre dané miesto. Pravdivým ukazateľom vhodnosti daného miesta na inštaláciu veterného zariadenia je jedine dlhodobéjšie meranie poveternostných podmienok. O vhodných a nevhodných miestach ako pre dané veterné zariadenie bude pojednané v ďalších kapitolách práce.

2.4 Energia vetra

Ako už bolo spomenuté v kapitole 2.1, energia, ktorú so sebou nesie vietor pochádza zo slnečného žiarenia. Slnečné žiarenie nerovnomerne zahrieva povrchy Zeme a tým sa mení teplota, hustota vzduchu a aj hydrostatický tlak v rovnakých výškach. Výsledkom je pohyb istej časti vzduchu.

Energia, ktorú priame naša planéta je zhruba $1,54 \cdot 10^{18}$ kWh za rok. 2,5% z celkovej energie prichádzajúcej na planétu na sa premení na energiu vetra, pochádza z energie slnečného žiarenia (prostredníctvom nerovnomerného ohrievania vzduchu cez zohriaty povrch Zeme a atmosféru, čiže na energiu vetra má vplyv energia absorbovaná samotnou planétou aj absorbovaná len vzdušným obalom), vplyvom trenia sa musí dopĺňať aby sa udržal pohybový stav atmosféry. Vzdušný obal podľa kapitoly 2.1 pohltí 58% z celkovej energie, teda $9 \cdot 10^{17}$ kWh. Z tejto energie sa na udržanie pohybového stavu atmosféry minie 2% jej hodnoty a to predstavuje $1,8 \cdot 10^{16}$ kWh. Ostatná energia teda 98% je premenená na vnútornú energiu atmosféry a je vyžiarená späť do vesmíru.

Existuje viacero foriem energie. Ako je tiež spomenuté v kapitole 2.1, táto energia je uschovaná v rôznych formách. Energia pohybujúcej sa hmoty ale patrí medzi najnákladnejšie formy energie. Platí pre ňu elementárny vzťah

$$E_k = \frac{1}{2} m_{vz} \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad (2.2)$$

kde v [m/s] je rýchlosť a m_{vz} [kg] je hmota. Hmotnosť je hustota ρ [kg/m³] a objem V [m³]

$$m_{vz} = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot s \quad [\text{kg}] \quad (2.3)$$

kde S [m²] je prietoková plocha a s [m] je dráha prúdiaceho vzduchu za jednotku času.

Výkon vetra sa dá vyjadriť v rôznych formách. Úplne všeobecne je výkon energia, spotrebovaná alebo nadobudnutá počas jednotky času

$$P = \frac{E}{t} \quad [\text{W}] \quad (2.4)$$

energia alebo práca je daná elementárnym vzťahom, kde F [N] je sila konajúca prácu a s [m] je dráha na ktorej sa práca koná

$$E = F \cdot s \quad [\text{J}]. \quad (2.5)$$

Dosadením rovnice 2.5 do rovnice 2.4 vznikne vzťah pre výkon

$$P = F \cdot \frac{s}{t} = F \cdot v \quad [\text{W}] \quad (2.6)$$

výkon vetra v takejto forme je teda sila, ktorú vytvorí vietor pri rýchlosti vetra v .

Sila vetra sa dá určit' z jednoduchej rovnice

$$F = p \cdot S \text{ [N]} \quad (2.7)$$

kde p [Pa] je tlak vetrom vytvorení a S je plocha na ktorej tlak pôsobí. Tlak vetra sa dá určit' z jednoduchej rovnice zákona zachovania energie. Zákon zachovania mechanickej energie tekutín sa vola Bernoulliho rovnica a udáva rovnosť tlakovej, kinetickej a polohovej energie medzi dvoma bodmi ležiacimi na prúdnici. Tlak ktorý vietor vytvorí teda pochádza z jeho rýchlosti, kedy sa v jednom mieste vietor ešte pohybuje, v druhom ale už stojí. Pre prehľadnosť sa uvádza celá rovnica

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 \text{ [J/kg]} \quad (2.8)$$

pri predstave vodorovnej prúdnice sa môže polohová energia na oboch stranách zanedbať. Predpokladom je tiež to, že hustota vzduchu sa nemení. Keďže sa zisťuje pretlak, tlak p_1 sa môže zanedbať, pretože sa jedná o barometrický tlak. Rýchlosť v_2 sa rovná nule, pretože v tom mieste už vzduch stojí a rýchlosť v_1 je pôvodná rýchlosť vetra. Po uvážení všetkých spomínaných faktov sa vzťah zjednoduší na a tento tlak sa nazýva dynamický

$$p = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \text{ [Pa]} \quad (2.9)$$

Po uvážení rovníc 2.9, 2.7 a ich dosadení do rovnice 2.6 dostávame konečný vzťah pre výkon pohybujúcej sa časti vzduchu, pretekajúcej cez oblasť S a pri rýchlosti v

$$P_w = \rho \frac{v^2}{2} S v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \text{ [W]} \quad (2.10)$$

Výkon vetra sa tiež zvykne uvádzať v tvare vzťahnutom na jednotkovú plochu, výsledkom potom bude merný výkon

$$P_m = \frac{1}{2} \rho v^3 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.11)$$

Zo vzťahu 2.10 je evidentné, že najväčší vplyv na výkon veterného zariadenia bude mať samotná rýchlosť vetra, ktorá sa zvyšuje s tret'ou mocninou, hustota a plocha zariadenia nemajú až taký veľký vplyv. Existujú ale podobné zariadenia, ktoré ale nezachytávajú vzduch ale vodu, jedná sa o prílivové elektrárne. Hustota vody je v porovnaní s hustotou vzduchu oveľa vyššia, dokonca až o tri rády, v tomto prípade teda hustota má výrazný vplyv na výkon.

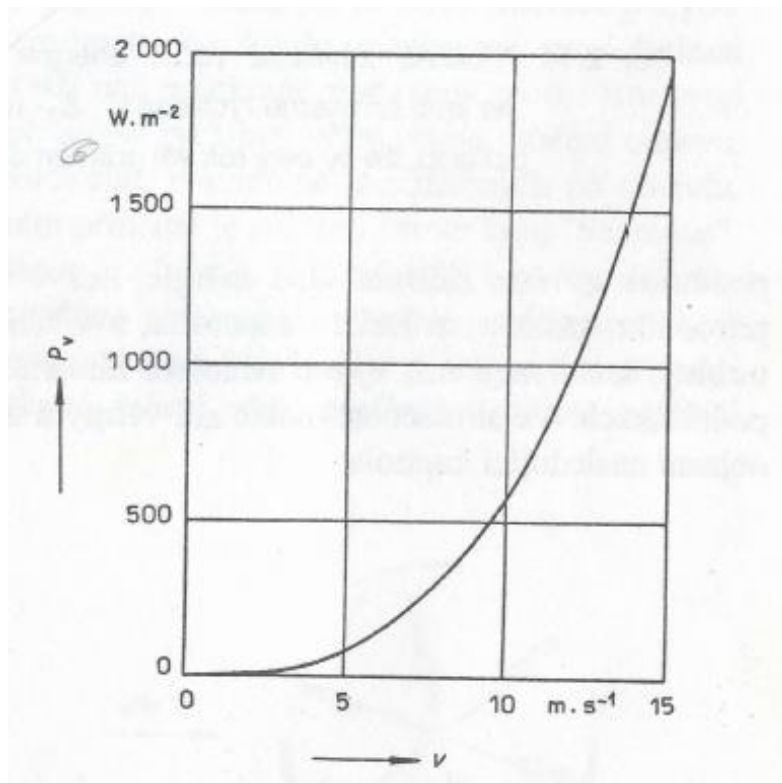
Rýchlosť vetra sa dá nmerať pomocou anemetrov. Problémom je ale odmerať hustotu vzduchu. Hustotu je preto jednoduchšie vypočítať. Použiť sa pritom dá stavová rovnica

$$\rho = \frac{p_b}{r_{\text{plyn}} T} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2.12)$$

kde p_b je barometrický tlak, r_{plyn} je plynová konštanta ($287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a T [K] je termodynamická teplota ($T = 273 + t_{\text{tep}}$, kde t_{tep} je teplota v stupňoch Celsia). Barometrický tlak nie je konštantný, záleží na konkrétnej výške h [m], kde sa určuje. Dá sa určit' podľa približného vzťahu

$$p_{b(h)} = p_{b(0)} \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} h + 0,5291 \cdot 10^{-8} h^2) \text{ [Pa]} \quad (2.13)$$

Podľa vyššie uvedených vzťahov sa dá určit' výkon vetru v závislosti na rýchlosti vetru pre dané miesto.



Obr. 2.10 Závislosť výkonu vetra pretekajúceho 1 m² na jeho rýchlosti [6]

Pretože sa rýchlosť vetru a teda aj výkon v závislosti na čase menia, vyjadruje sa energia vetra za daný časový interval pretekajúca jednotkovou plochou nasledujúcim vzťahom

$$E_v = \int_{t_2}^{t_1} P_m \cdot dt \quad [\text{J/m}^2] \quad (2.14)$$

takto vypočítaná celková energia vetru by bola najpresnejšia pretože by zachytávala aj malé zmeny vetra. Na meranie by bol potrebný veľmi citlivý anemometer a spracovanie veľkého množstva dát by bolo veľmi pracné. Preto sa celková energia vetra za daný čas uvádza ako suma jednotlivých nameraných údajov za jednotlivé časové intervaly Δt

$$E_v = \sum_0^i E_i = \frac{1}{2} \sum_0^i \rho_i v_i^3 \Delta t \quad [\text{J/m}^2] \quad (2.15)$$

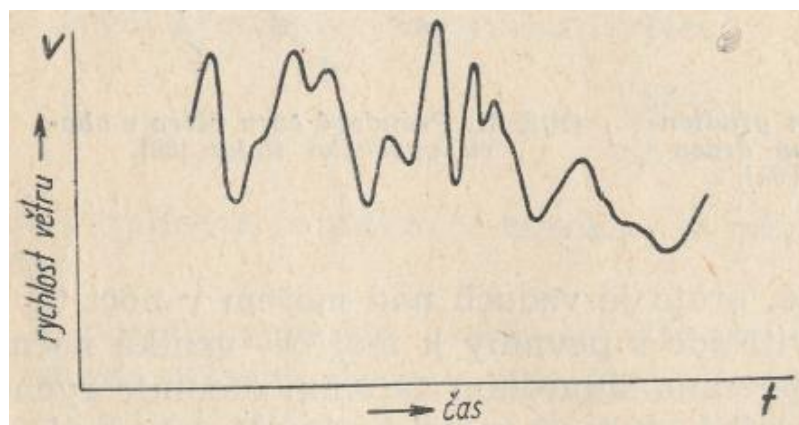
Bez ohľadu na mieru nepresnosti je veľmi dôležité poznať výkon a energiu vetra pretekajúceho cez jednotkovú plochu. Nejde totiž z vetru odobrať viac energie ako v ňom je. [6] Na tento fakt netreba zabúdať. V reálnej situácii nie je možné z vetru odobrať ani celú, dokonca ani polovicu z energie, ktorú si so sebou nesie. O tomto fakte budú pojednávať ďalšie kapitoly.

2.5 Charakteristiky vetru

Vietor, ako veľmi premenlivý prírodný jav je nutné nejako popísať. Pre popis sa používajú charakteristiky vetru. Tieto charakteristiky je nutné poznať pre isté miesto, kde sa veterné zariadenie plánuje postaviť. Vyplývajú väčšinou z meraní pre dané miesto, ktoré je nutné spraviť a vyhodnotiť dlho predtým, než sa veterné zariadenia v danej oblasti postaví.

2.5.1 Rýchlosť vetru

Ako už bolo spomínané vo vyššie uvedených kapitolách, vietor vzniká vplyvom slnečného žiarenia. Keďže sa uhol dopadajúcich slnečných lúčov v priebehu dňa mení, bude táto zmena vplývať aj na vznikajúci vietor teda jeho rýchlosť. Okrem toho na rýchlosť vetra bude vplývať aj ročné obdobie, prípadne aj prechod väčších vzduchových hmôt, studených frontov atď. Špeciálne v zastavaných oblastiach bude rýchlosť vetra veľmi premenlivá kvôli rôznym turbulenciám a javom vyplývajúcim z členitosti terénu. Z daných faktov vyplýva, že rýchlosť vetra sa s časom mení veľmi rýchlo a určite nebude stála po dlhšiu dobu, hlavne čo sa týka prízemnej vrstvy. Je teda charakterizovaná svojou okamžitou hodnotou v . Pre výpočet výkonu veterného zariadenia sa ale okamžitá hodnota rýchlosti vôbec nehodí.



Obr. 2.11 Všeobecný časový priebeh rýchlosti vetru [2]

Ako ale rýchlosť vetra merať a vyhodnocovať? Existuje viacero prístupov. V meteorológii je zvykom uvádzať aritmetickú strednú hodnotu rýchlosti vetru, ktorá sa vypočíta z nasledujúceho vzťahu [2]:

$$v_{sa} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot dt \quad [\text{m/s}] \quad (2.16)$$

kde t_1 a t_2 sú časy, medzi ktorými sa rýchlosť vetru meria. Daný vzťah teda vychádza z okamžitej rýchlosti vetra. Problémom ale je, že každý merací prístroj má svoju zotrvačnosť a hmotu a teda sa s ním nedá okamžitú rýchlosť vetra merať. Merací prístroj vždy meria nejakú strednú rýchlosť, ktorá je definovaná podľa určitého zákona. [2]

V energetike sa ale pojem stredná aritmetická rýchlosť moc nepoužíva. Výkon obsiahnutý v istej pohybujúcej sa mase vzduchu je úmerný jej tretej mocnine. Ak by sa počítal výkon zariadenia z tejto rýchlosti, výpočet by bol zaťažený veľkou chybou. [2] Ak by sme dali do rovnosti energiu pochádzajúcu z veterného zariadenia za časový interval daný časmi t_1 a t_2 pri okamžitej rýchlosti vetra a energiu za rovnaký čas, ale pri rýchlosti, ktorá by bola konštantná, mohli by sme túto rýchlosť nazývať efektívna rýchlosť vetra:

$$E_{okamžitá} = E_{efektívna} \quad (2.17)$$

$$k \cdot \int_{t_1}^{t_2} v^3(t) \cdot dt = k \cdot v_e^3(t) \cdot (t_2 - t_1) \quad [\text{J}]$$

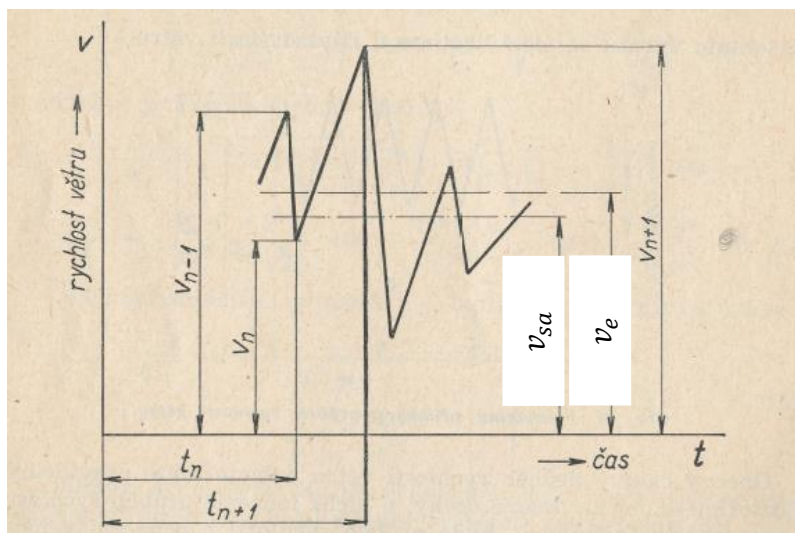
kde k je konštanta obsahujúca hustotu, plochu a iné konštanty. Z daného vzťahu sa dá určiť efektívna rýchlosť:

$$v_e = \sqrt[3]{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v^3(t) \cdot dt} \quad [\text{m/s}] \quad (2.18)$$

z uvedeného vzťahu je poznať, že by sme zase potrebovali okamžitú hodnotu rýchlostí, teda jej závislosť na čase. Problém funkcie okamžitej rýchlosti na čase sa dá zjednodušiť. Pri uvažovaní dostatočne malého časového kroku sa dá táto funkcia nahradit' priamkou a po úpravách je efektívna rýchlosť vetra daná nasledujúcim vzťahom, kde v_1 a v_2 sú rýchlosti na priamke v krajných bodoch časového intervalu:

$$v_e = \sqrt[3]{\frac{(v_2^2 + v_1^2) \cdot (v_2 + v_1)}{4}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.19)$$

Daný vzorec ale platí len pre malý časový krok a jednu priamku. Ak by sme ale chceli nahradit' celú závislosť okamžitej rýchlosti, môžeme ju po častiach rozdelit' na priamky, vhodne sčítat' a takto by sme dostali efektívnu rýchlosť pre celú závislosť okamžitej rýchlosti.



Obr. 2.12 Všeobecný časový priebeh rýchlosti vetru rozdelený na priamkové úseky [2]

Z efektívnej rýchlosti vetru sa už dá počítat' výkon veterného zariadenia. Zdroj [2] uvádza, že v krajných prípadoch môže chyba pri počítaní výkonu so strednou aritmetikou rýchlosťou miesto efektívnej rýchlosti až 50%.

Samotné meranie rýchlosti vetru sa väčšinou meria v meteorologických stanicích. Pre tieto merania sú prijaté určité štandardy ako výška, kde rýchlosť meria. [6] Samotné meranie sa robí miskovým anemometrom. Anemometer je na otáčajúcej sa hriadeli spojený v dolnej časti s permanentnými magnetmi, ktoré fungujú ako dynamo. Vyrobené napätie vzniknuté na vinutí satoru je úmerné rýchlosti vetru a meria sa galvanometrom. Ďalšou možnosťou ako merať rýchlosť vzduchu je jeho prejavom na nepohybujúce sa teleso, teda dynamického tlaku, ktorý vznikne pri zastavení vzduchu pri prúdení okolo telesa. Takýto rýchlomer je oveľa citlivejší na zmeny rýchlosti.

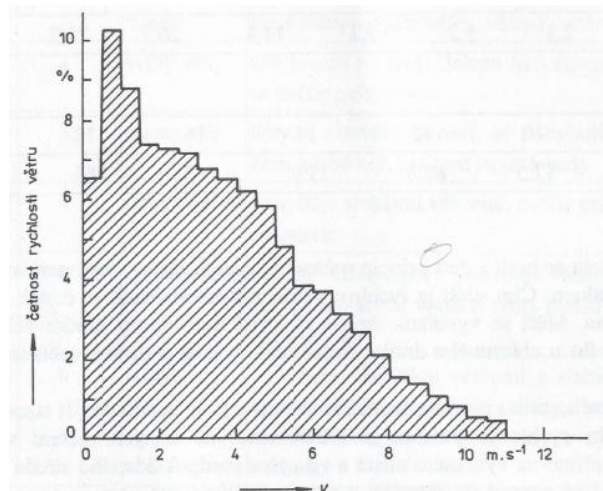
Tab. 2.2 Beauftova stupnica rýchlostí vetra [6]

Rýchlosť vetra od do [m/s]	Stupeň Beauforta	Sila vetru	Prejav v prírode
0 0,2	0	Bezvetrie	Dym stúpa kolmo
0,3 1,5	1	Vánok	Dym stúpa podľa vetru, veterná smerovka sa nepohne
1,6 3,3	2	Slabý vietor	Vietor je cítiť na tvári, šumí lístie, veterná smerovka sa hýbe
3,4 5,4	3	Mierny vietor	Listy sa pohybujú, hýbe vlajkou, slabo čerí hladinu vody
5,5 7,9	4	Dosť čerstvý vietor	Pohybuje slabšími vetvami, zdvíha prach, napína vlajku
8 10,7	5	Čerstvý vietor	Pohybuje väčšími vetvami, tvorí menšie vlny na vodnej hladine, pre pocit je nepríjemný
10,8 13,8	6	Silný vietor	Pohybuje menšími stromami, použitie dáždniku je zložité, na vode sa tvoria vlny
13,9 17,1	7	Prudký vietor	Vlny na vode majú spenené vrcholky, chôdza proti vetru je namáhavá
17,2 20,7	8	Búrlivý vietor	Láme vetvy stromov, chôdza je značne ťažká, pohybuje väčšími stromami
20,8 24,4	9	víchrice	Spôsobuje menšie škody na strechách, láme menšie stromy
24,5 28,4	10	Silná víchrice	Láme stromy, spôsobuje škody na príbytkoch
28,5 32,6	11	Mohutná víchrice	Spôsobuje veľké škody na majetku aj na lesoch
32,7 a viac	12	Orkán	Ničivé účinky

2.5.2 Početnosť rýchlosti vetru

Ako bolo popísané v predchádzajúcej kapitole, z praktických dôvodov sa neuvádzajú hodnoty ani priebehy okamžitej rýchlosti vetru. Uvádzajú sa hodnoty priemerných rýchlostí a efektívnych rýchlostí, platiace pre daný časový krok. Z týchto hodnôt sa dajú spracovať denné, mesačné alebo aj ročné priebehy rýchlostí vetru pre danú lokalitu. O výskyte rýchlostí vetru v istej lokalite ale nemusí byť priebeh rýchlostí úplne priehľadný a nemôže byť vodítkom pre výpočet práce, ktorú sa dá z vetra získať. [2] Priehľadnejšia pomôcka je graf početnosti výskytu rýchlostí.

Graf početnosti rýchlostí znázorňuje pomernú dobu výskytu danej rýchlosti pri meraní, ktoré trvá určitú dobu. Z takéhoto grafu sa dá ľahko vytvoriť predbežný výpočet veterného zariadenia, keďže sa z neho dá vyčítať rýchlosť vetru ale aj jej trvanie. Takto sa získa stĺpcový diagram. Na vodorovnej ose je rýchlosť vetru a na vertikálnej pomerná doba, ktorou vietor danou rýchlosťou fúka (tato pomerná doba závisí na hustote delenia na vodorovnej ose). Môže sa uvádzať pre jeden deň, alebo aj rok, záleží od doby merania. Miesto stĺpcového diagramu sa dá použiť funkcia, ktorá sa nazýva distribučnou funkciou pravdepodobnosti výskytu rýchlosti vetru. Jej tvar a poloha sú závislé na miestnych podmienkach a priemernej rýchlosti vetru. Dá sa teda predpokladať, že v dvoch podobných miestach s podobnou priemernou rýchlosťou vetru a reliéfom povrchu sa dá predpokladať podobne častý výskyt vetru o danej rýchlosti.



Obr. 2.13 Početnost' rýchlostí vetra vyjadrená stĺpcovým grafom [6]

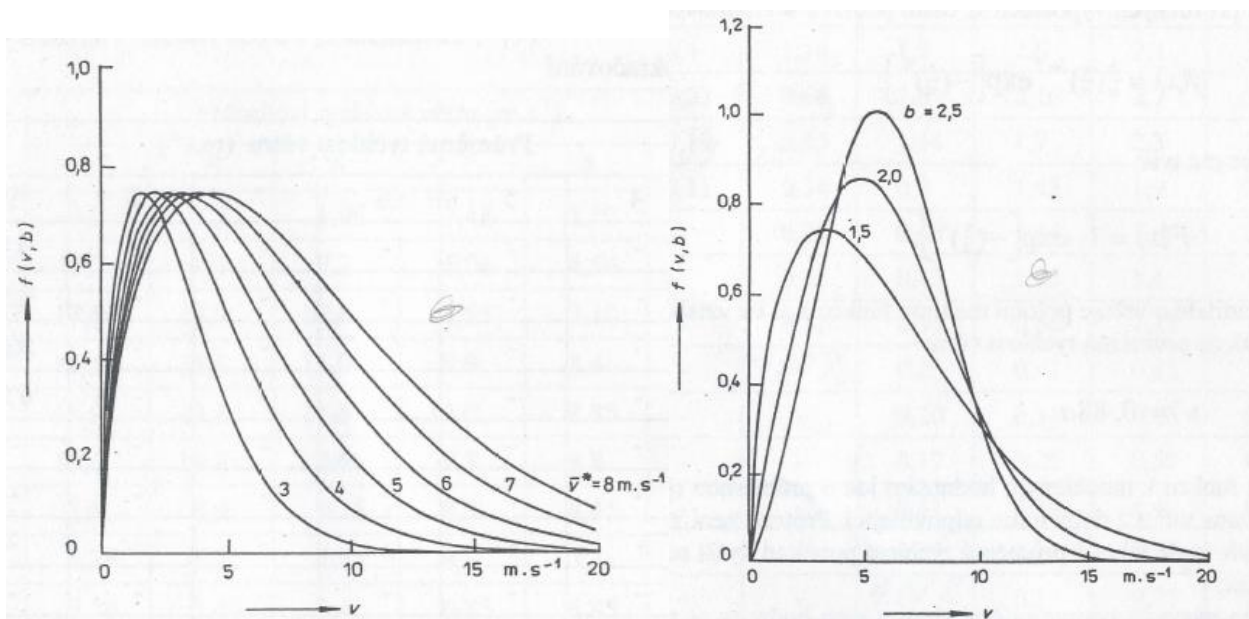
Pre popis distribučných funkcií sa často používa Weibullove rozdelenie pravdepodobnosti výskytu, je s distribučnými funkciami rýchlostíami vetra veľmi podobné a dá sa popísať vzťahmi (distribučná funkcia Weibullového rozdelenia):

$$f(x) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right] \quad [-] \quad (2.20)$$

Veľkosť súčiniteľa a [-] ovplyvňuje polohu maxima a súvisí s dá sa odhadnúť z priemernej rýchlosti vetra :

$$\bar{v} \approx 0,88 \cdot a \quad [\text{m/s}] \quad (2.21)$$

Súčiniteľ b [-] sa nazýva tvarový súčiniteľ a tiež ovplyvňuje polohu maxima a tvar distribučnej funkcie. To ako menia tieto súčinitele tvar funkcií podľa Weibullového rozdelenia je znázornené na nasledujúcich obrázkoch.



Obr. 2.14 Vľavo- tvar náhradných distribučných funkcií pre rôzne stredné rýchlosti vetru pri konštantnom parametre b . Vpravo- tvar náhradných distribučných funkcií pre konštantnú strednú rýchlosť a rôzne hodnoty parametra b [6]

Ako je z grafov vidieť, nepostihujú obdobia bezvetria. Weibullove rozdelenie teda úplne nepopisuje reálnu situáciu, stĺpcový diagram áno. Weibullove rozdelenie lepšie popisuje skutočnosť pri vyšších priemerných rýchlostiach a teda lepšie postihuje veternejšie miesta.

Z tvaru distribučných funkcií vytvorených pre dané miesto sa dá uvažovať aj o celkovej energii pretekajúcej cez plochu, keďže súčinitele a , b súvisia s priemernou rýchlosťou vetra a tvarom povrchu. Pri plochom tvare distribučnej funkcie, teda pri nízkom súčiniteli b (malá drsnosť povrchu) pretečie cez plochu viac energie ako pri špicatom tvare funkcie. Plochejší tvar funkcie znamená teda hojný výskyt vetru so širokým pásmom rýchlostí. Špicatý tvar naopak vystihuje výskyt vetru s veľmi úzkym pásmom rýchlostí. Obecne platné je, čím je poloha maxima posunutá vpravo (do vyšších rýchlostí) tým je miesto veternejšie a vhodnejšie pre stavbu veterného stroja.

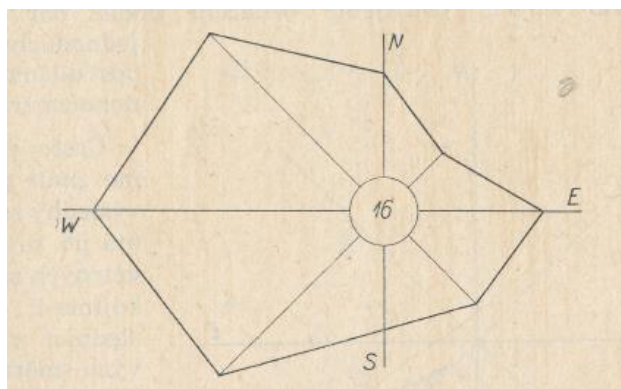
Distribučné charakteristiky sa budú v priebehu roku meniť. Je potom nutné brať na toto ohľad pri uvažovaní nad kúpou veterného zariadenia, ktoré by malo sezónne využitie. Ako už bolo spomenuté, ďalší dôležitý údaj je o dobe bezvetria (Weibullova charakteristika toto neuvažuje). Dobrý údaj o využiteľnosti energie vetra dávajú aj veterné mapy štátov, ktoré uvádzajú priemernú rýchlosť vetra v istom mieste (zahrňujú obdobie bezvetria).

Voľba stanoviska pre veterný stroj z pohľadu rýchlostí a ich výskytu nie je úplne jednoduchá a presné údaje sa dajú získať jedine dlhodobým meraním, inak je človek pri návrhu odkázaný len na isté priblíženia a prepočty, ktoré sú samozrejme zaťažené chybou.

2.5.3 Smer vetru

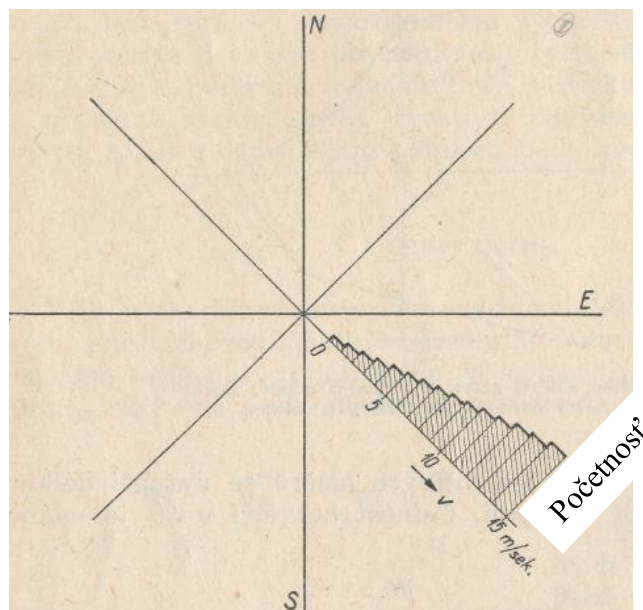
V predchádzajúcich kapitolách bolo pojednávané o rýchlosti vetra a jej početnosti, teda dobe výskytu, bolo pritom pojednávané o veľkosti rýchlosti. Nakoľko rýchlosť je vektorová veličina, je charakterizovaná okrem svojej veľkosti aj svojím smerom. Práve smer vetra môže byť pre niektoré stanoviská veľmi dôležitý, predovšetkým čo sa zastavaných oblastí týka, pretože v rôznych smeroch sú vetru postavené rôzne prekážky a teda rýchlosť v jednom pevnom mieste pri rôznych smeroch bude tiež veľmi rozdielna.

Úplný prehľad o veternej situácii v danom mieste bude charakterizovaný veľkosťou rýchlosti vetra, dobou výskytu vetra, ale aj smerom vetra. Tieto veličiny sa dajú vyniesť na takzvanú ružicu smeru vetru, kde sú na dvoch kolmých priamkach vyznačené hlavné svetové strany. Úsečka nasmerovaná vzhľadom na túto ružicu ukazuje teda smer vetra. Dĺžka úsečky značí početnosť výskytu vetru daného smeru.



Obr. 2.15 Ružica smeru vetru pre konkrétnu lokalitu. Dĺžky úsečiek značia početnosť výskytu daných rýchlostí [2]

Všetky tři hlavní spomínané veličiny (směr, početnost, rychlost) se dají vynést do jednoho obrázku, vtedy sa na úsečku smeru vynesie stĺpcový graf početností daných rýchlostí.



Obr. 2.16 Ružica smeru vetru s vyneseními početnosťami rýchlostí pripadajúcich do určitého smeru [2]

Pre veľké zariadenia, ktoré pomaly reagujú na zmenu smeru je tiež veľmi dôležité poznať hlavný priemerný smer vetru, získaný z meraní trvajúcich nejakú dobu. Pre ružicu so smermi a početnosťami ich výskytu sa postupne úsečky vektorovo sčítavajú až sa dostane výslednica, ktorá je priemerným a hlavným smerom.

Samozrejme, existujú zariadenia, ktoré na zmenu smeru reagujú veľmi rýchlo, sú to napríklad Savoniove rotory, Darejove rotory, prípadne aj menšie veterné turbíny so smerovým kormidlom. Pre tieto zariadenia nie je smer vetra príliš dôležitý, pretože buď vedú zachytávať vietor z akéhokoľvek smeru, alebo na túto zmenu smeru reagujú veľmi rýchlo.

2.5.4 Nárazovosť vetru

Pod pojmom nárazovosti vetra rozumieme veľmi rýchlu zmenu smeru a rýchlosti vetra. Rozdeliť sa dá na nárazovosť smeru a nárazovosť rýchlosti. Nárazovosť sa podľa rôznych autorov uvádza rôzne, dôležité ale je aby zachytávala početnosť a amplitúdu týchto nárazov v istom časovom kroku t . Dá sa tiež napríklad uviesť nasledovne v percentuálnej hodnote vzhľadom na strednú aritmetickú rýchlosť [2]:

$$B_{narazy} = \frac{v_{max} - v_{sa}}{v_{sa}} \cdot 100 \quad [-] \quad (2.22)$$

Vzorec 2.22 však nezachytáva početnosť týchto nárazov. Existujú však aj zložitejšie vzorce zachytávajúce početnosť. Pre stanovisko veterného stroja je nárazovosť vetra dôležitou veličinou. Existujú stroje, ktoré dokážu zachytávať takéto rýchle zmeny, niektorým typom strojov to však úplne nevyhovuje. Nárazovosť je tiež nutné poznať z dôvodu bezpečnosti, rýchle a silne poryvy vetra vedú zariadeniu uškodiť z hľadiska pevnostného a pri častom výskyte týchto javov je niekedy lepšie zariadenie odstaviť.

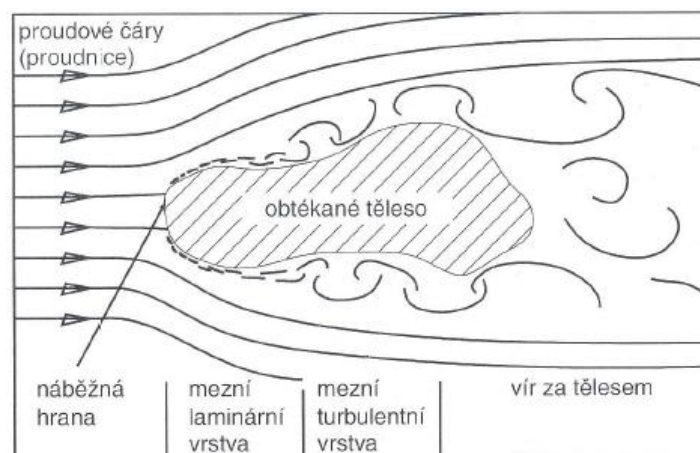
Ako už bolo spomenuté, všetky spomenuté charakteristiky sa nedajú vždy vypočítať alebo odhadnúť pre isté miesto. Preto by malo pred inštaláciou zariadenia predchádzať dôkladné meranie. Len z neho sa dá istotne vybrať typ a veľkosť zariadenia vhodného pre danú lokalitu. Okrem iného je nutné pred inštaláciou zariadenia dbať na legislatívu ale aj bezpečnosť a vizuálny efekt v krajine, ktorý zariadenia vytvorí.

2.6 Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 2

- Energia vetra na Zemi je ohromná. Jej využitie však nie je úplne možné pretože veľké rýchlosti vetra sa nachádzajú vo výškach niekoľko kilometrov. Rýchlosti vetra v blízkosti povrchu sú výrazne nižšie.
- Pôvodom vetra je slnečné žiarenie. Rýchlosť vetra udáva aktuálne natočenie Zeme voči slnku ako aj miestne podmienky. Čo sa týka smeru vetra, dá sa hovoriť o pravidelnosti pre jedno konkrétne miesto (napr. rozdiel medzi južnou a severnou pologuľou).
- Prúdenie vzduchu je ovplyvnené lokálnymi podmienkami, hlavne topografiou povrchu. Aj keď sú definované pohyby vzduchu v malej mierke, v našich končinách je prúdenie vzduchu v značnej miere ovplyvnené presunom veľkých tlakových výši a níží vznikajúcich nad Atlantickým oceánom. Vietor u nás je teda z väčšej miery daný globálnym charakterom prúdenia a miestne podmienky ho ovplyvňujú len z malej časti (čo sa týka vzniku, veľkosti a smeru, nemyslí sa ovplyvnenie napr. prekážkou). Dôležité je tiež podotknúť, že najčastejší výskyt pre centrálnu Európu má prúdenie smerujúce zo západu na východ.
- Viac ako na ničom inom závisí energia vetra na jeho rýchlosti. Energia vetra rastie s tretou mocninou rýchlosti vetra.
- Keďže návrh veterného zariadenia vychádza predovšetkým z návrhovej rýchlosti vetra je nutné pre dané stanovisko umiestnenia veterného stroja poznať všetky charakteristiky tejto rýchlosti. V reálnej situácii a pre nízkovýkonové zariadenia nie je možné poznať a vytvoriť všetky charakteristiky vetra z časového a procesného hľadiska. Preto zariadenie umiestnené v malých výškach a pracujúce s premennými podmienkami musí byť navrhnuté pre čo najväčšiu variabilitu aby bolo schopné zachytávať širokú škálu rýchlostí vetra pri premennom smere a s čo najvyššou účinnosťou pri premenných otáčkach.

3 Špecifiká prúdenia vzduchu v obývaných oblastiach

Nasledujúca kapitola bude venovaná prúdeniu vetra v zastavaných oblastiach, kde je reliéf povrchu veľmi členitý. Pohyby vzduchu v takomto teréne sa dajú explicitne vyjadriť, vizualizovať pomocou prúdnic, prípadne simulovať v špeciálnych softwaroch. Práve simulácia prúdenia uvedená nižšie by mala priniesť najlepšiu predstavu o tom, ako vzduch v takomto prostredí prúdi, akých dosahuje rýchlostí a kde vznikajú najväčšie turbulencie. Z toho bude vyplývať vhodné stanovisko pre umiestnenie veterného stroja. Práve členitý reliéf povrchu je tým, čím sa práca líši od klasického návrhu veternej elektrárne. Pri návrhu klasickej veternej elektrárne sa vychádza z meraní pre miesto, ktoré bolo určené ako najvhodnejšie pre inštaláciu. Toto miesto je charakterizované trvalým vetrom o vyššej rýchlosti s prevažne stálym smerom. Lopatky veternej turbíny sa potom navrhujú na jednu rýchlosť, ktorá je pre dané miesto energeticky najprínosnejšia. Pre túto rýchlosť vzduchu má potom veterná turbína najvyššiu účinnosť. Klasické veterné turbíny sa spravidla stavajú vo veľkých výškach, kde už ako bolo spomínané v kapitole 2.1 je v priemere vyššia rýchlosť vetra a vietor je tiež stálejší. Prúdenie vzduchu v tejto výške sa dá považovať za laminárne. Veterná turbína teda koniec koncov spracováva trvalý vietor o veľkej rýchlosti a s relatívne stálym smerom. Veterné stroje v členitom teréne ale takéto šťastie nemajú, vietor je premenlivý, priemerná rýchlosť vetra je nižšia a jeho smer sa tiež často v priebehu dňa mení. V týchto oblastiach sa dá teda prúdenie považovať za turbolentné.



Obr. 3.1. Formy prúdenia vzduchu pri obtekaní všeobecného telesa [13]

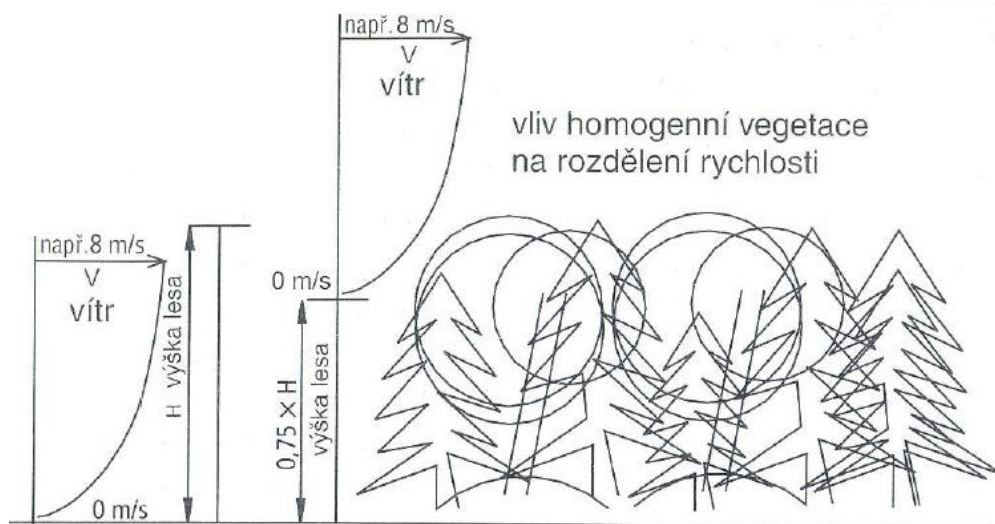
3.1 Závislosť rýchlosti vzduchu na výške a reliéfe povrchu

Rýchlosť vetru je ovplyvňovaná do istej výšky povrchom Zeme. V blízkosti povrchu vzniká pri prúdení vzduchu medzná vrstva, kde rýchlosť smerom k povrchu klesá a v ktorej má drsnosť povrchu veľký vplyv na prúdenie a v nej prebieha trenie prúdiacej látky s pevným povrchom. V najjednoduchšom prípade, kedy je terén rovný je rýchlosti na výške závislá len na drsnosti povrchu a platí vzťah [6]

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad [-] \quad (3.1)$$

kde \bar{v} [m/s] je priemerná rýchlosť vetru vo výške h [m] nad hladinou prekážok alebo vegetácie a \bar{v}_0 [m/s] je priemerná rýchlosť vetru v danej výške h_0 [m] nad pomyselnou hladinou vegetácie, či prekážok.

Výška h_0 teda nie je výška od povrchu zeme. Výška h_0 je určená vzhľadom na výškovú hladinu, kde je rýchlosť vetru rovná nule (nulová hladina). Je dôležité si to uvedomiť, pretože výška od zeme a výška nad hladinou vegetácie kde vzniká rýchlostný profil môžu byť veľmi rozdielne najmä čo sa týka lesných porastov ako je znázornené na obrázku 3.2, kde výška lesa je pár desiatok metrov a až od tejto výšky sa začína tvoriť rýchlostný profil, presnejšie od troch štvrtín tejto výšky, z dôvodu rednutia hustoty porastu smerom hore, v prípade budov či zástavby by ale nulová výška bola zhruba vo výške budovy. Značný rozdiel môže vznikáť v obývaných miestach, kde nulová hladina rýchlosti vetra môže byť vo výške niekoľko metrov nad povrchom zeme. Rozdiel pár metrov vzniká aj na poliach, kde sa pestujú hospodárske plodiny.



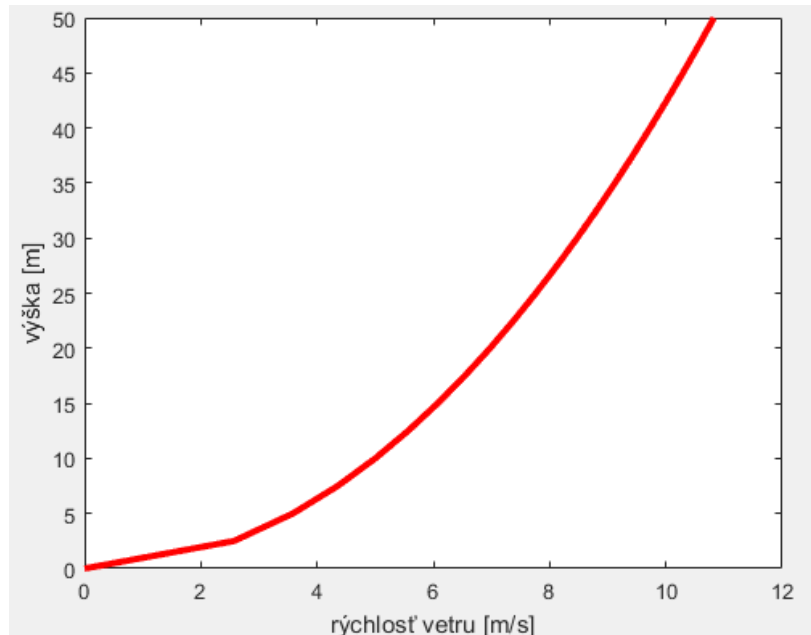
Obr. 3.2 Příklad zmeny nulovej výšky rýchlostného profilu. [13]

Exponent n [-] z rovnice 3.1 závisí na drsnosti povrchu a jeho hodnoty sú uvedené v tabuľke 3.1.

Tab. 3.1. Závislosť exponentu n zo vzťahu 3.1 na druhu povrchu [6]

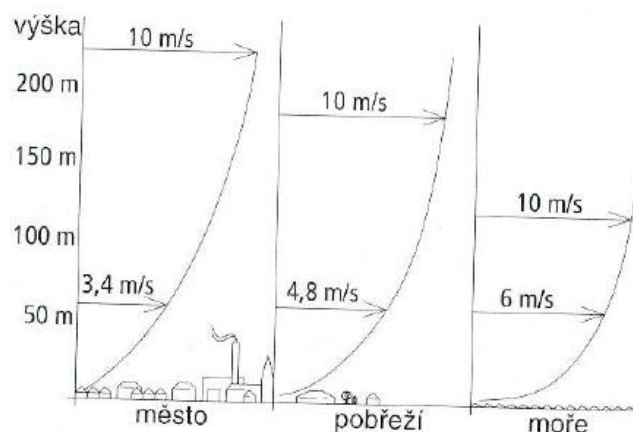
Druh povrchu	n
a- hladký povrch, vodná hladina	0,14
b- lúky	0,16
c- vysoká tráva	0,18
d- porasty vysokých plodín, riedke lesy	0,21
e- husté lesy	0,28
f- dedina a malé mestá	0,48

Na ukázkú je obrázku nižšie vykreslená závislosť 3.1 pre hodnotu exponentu $n=0,48$ a rýchlosť $\bar{v}_0 = 5 \text{ m/s}$, čo odpovedá drsnosti povrchu malých obývaných oblastí. Rýchlosť vzduchu je tu vypočítaná až do výšky 50 metrov, kde dosahuje približne veľkosť 11 m/s.



Obr. 3.3 Závislosť rýchlosti vetra na výške vypočítaná zo vzťahu 3.1 pre hodnotu exponentu $n=0,48$, čo by malo odpovedať drsnosti povrchu malých miest a dedín [autor]

Tvar rýchlostného profilu závisí teda predovšetkým na exponente n . Z logických úvah vyplýva, že ak bude exponent n malý, teda krajina má malú drsnosť povrchu, bude nárast rýchlosti v rýchlostnom profile prudší. Vplyv exponentu n na tvar rýchlostného profilu ukazuje obrázok 3.4.



Obr. 3.4 Závislosť tvaru rýchlostného profilu pre rôzne povrchy s rôznou drsnosťou povrchu, teda rôznym n z rovnice 3.1. [13]

Ako je zo vzťahu 3.1 vidieť, na to aby sme sa dopočítali k rýchlosti v ľubovoľnej výške h , je najprv nutné vedieť priemernú rýchlosť vetra v istej výške, čo nemusí byť pre dané miesto vždy určené a je nutné spraviť meranie, pre určenie tejto priemernej rýchlosti.

Pre zjednodušenie výpočtu sú pre vyššie uvedené exponenty prepočítané hodnoty vyjadrené korekčným súčiniteľom k_h [-] pri výpočte rýchlosti inej ako vo výške 10 m, ktorý v sebe zahŕňa podiel výšok a exponent n . Tiež je ale nutné vedieť priemernú rýchlosť vo výške 10 m, alebo inú priemernú rýchlosť a vzorec si podľa toho upraviť [6]

$$\bar{v}_h = k_h \cdot \bar{v}_{10} \quad [\text{m/s}] \quad (3.2)$$

Zjednodušený výpočet sa dá použiť aj v prípade, že nameraná referenčná priemerná rýchlosť nie je určená pre výšku 10 m, ale dajú sa použiť korekčné koeficienty určené pre výšku 10 m, potom sa vzorec upraví nasledovne (napríklad pre nameranú rýchlosť vo výške 5 m a zisťovanú pre výšku 25 m) [6]

$$\bar{v}_{25} = \frac{k_{25}}{k_5} \cdot \bar{v}_5 \quad [\text{m/s}] \quad (3.3)$$

A po úprave vyzerá vzt'ah nasledovne

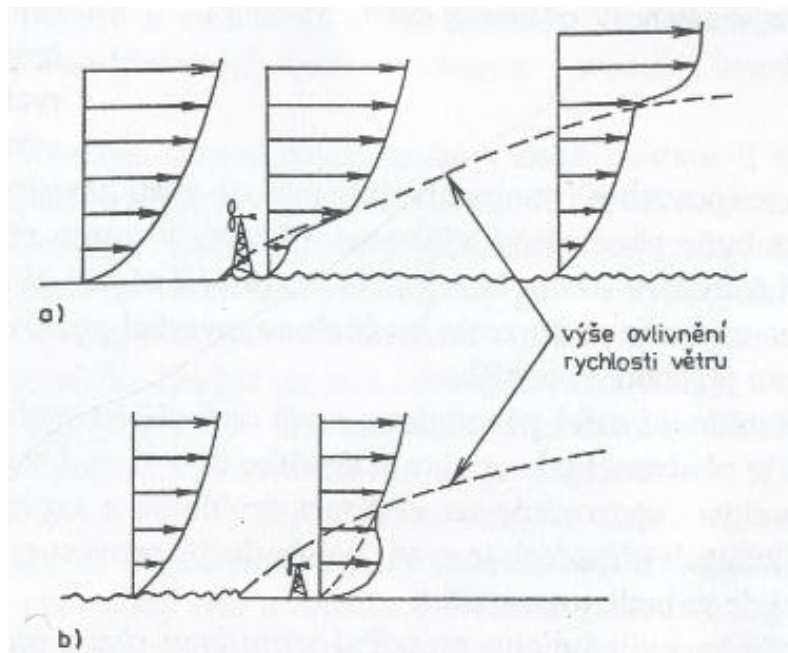
$$\bar{v}_{25} = \frac{k_{25}}{k_5} \cdot \bar{v}_5 = \frac{\left(\frac{h_{25}}{h_{10}}\right)^n}{\left(\frac{h_5}{h_{10}}\right)^n} \cdot \bar{v}_5 \quad [\text{m/s}] \quad (3.4)$$

Takýmto spôsobom sa teda dá prepočítať hodnoty rýchlostí v ľubovoľnej výške, pretože veterné zariadenie sa prakticky vždy umiestňuje do väčšej výšky, voči výške v ktorej bolo meranie rýchlosti vetru vytvorené (veterné mapy krajín, hydrometeorologické ústavy...). Konkrétne hodnoty korekčného koeficientu sa dajú nájsť v literárnom zdroji [6].

3.2 Vplyv zmeny drsnosti povrchu na rýchlostný profil vetra

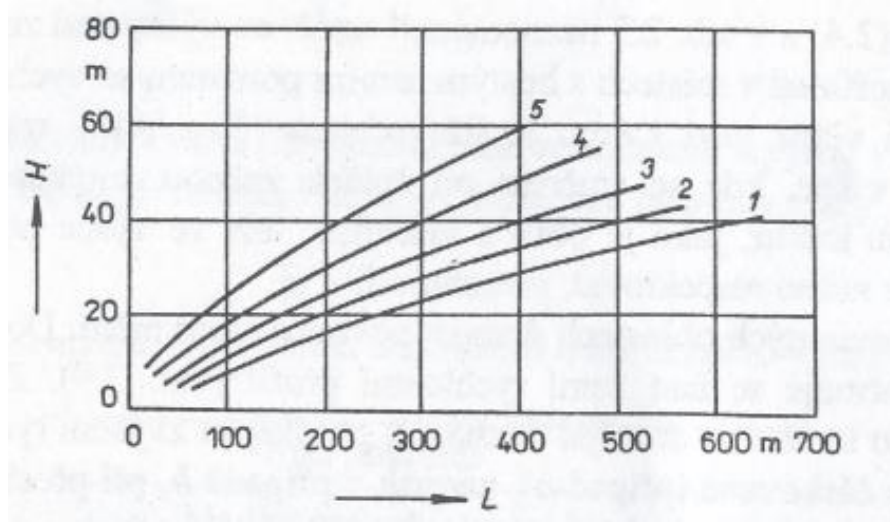
Otázkou tiež je, ako sa mení rýchlostný profil pri prechode nad terén s inou drsnosťou. Keďže v našich podmienkach sa drsnosť povrchu mení často, je to nutné uviesť. Pôvodný rýchlostný profil sa začne deformovať a s postupom času (vzdialenosti od zmeny) by sa vytvoril nový rýchlostný profil odpovedajúci novej drsnosti povrchu. V reálnych podmienkach členitého terénu sa ale nestihne vytvoriť, pretože vietor prejde opäť na nový povrch s inou drsnosťou [6].

Pri prechode z hladkého terénu na drsnejší, dochádza k zvýšeniu rýchlosti v blízkosti nad hranicou vyznačenou v obrázku 3.5 čiarkovane, vplyvom spomalenia prúdu v nižších výškach drsnejším povrchom (vyplýva to zo zákona zachovania hmotnosti, ak sa v istom mieste prúd spomalí, tak pri konštantnom hmotnostnom toku sa musí niekde zrýchliť). A naopak, pri prechode prúdu z drsnejšieho na hladší sa v blízkosti povrchu prúd zrýchli a pri hranici ovplyvnenia prúdu (čiarkovaná v obr. 3.5) sa prúd naopak spomalí [6]. Hranicu medzi novo vznikajúcim profilom a neovplyvnenou oblasťou si ale netreba predstavovať ako ostrú hranicu, v skutočnosti môže mať rozhranie hrúbku 3 až 6 metrov a nazýva sa prechodová výška. Rozdiel medzi pôvodným profilom a novo vznikajúcim profilom postupne s pribúdajúcou vzdialenosťou od zmeny klesá, až napokon vôbec nie je rozpoznateľný, vtedy je už prúdenie ustálené a prispôbené aerodynamickým charakteristikám nového povrchu.



Obr. 3.5 Vplyv zmeny drsnosti na tvar rýchlostného profilu v blízkosti Zemského povrchu. a) zmena z hladkého na drsný, b) zmena z drsného na hladký [6]

Prepočet priemernej rýchlosti podľa vzťahu (3.1) alebo (3.2) sa pri zmenách drsnosti povrchu nedá použiť a je nutné postupovať inak. Je nutné stanoviť takzvanú prechodovú výšku H_{prech} [m], kde má drsnosť veľký vplyv na vznikajúci rýchlostný profil (v obrázku 3.5 je to výška okolo čiarkovanej čiary) a do tejto výšky sa dá očakávať náhla zmena rýchlostí pretože predovšetkým v tejto výške sa postupne vytvára nový rýchlostný profil prúdenia vzhľadom na inú drsnosť. Prechodová výška teda tvorí akúsi hranicu medzi novým a starým rýchlostným profilom.



Obr. 3.6 Závislosť prechodovej výšky H_{prech} (v závislosti označenej ako H) na vzdialenosti od zmeny kvality povrchu pre rôzne typy zmien povrchov (1-6) [6]

Čísla kriviek v grafe značia, o akú zmenu drsnosti sa jedná na základe klasifikácie povrchov v tab. 3.1, zdroj [6] však neuvádza konkrétne o aké zmeny sa jedná. Na horizontálnej osi sa nachádza vzdialenosť L [m] od miesta, kde zmena drsnosti nastala. Podľa vzdialenosti L a príslušnej krivky sa dá určiť prechodová výška H_{prech} [6]. Pre toto určenie je

ale nutné poznať predbežné umiestnenie veterného stroja a predpokladaný najčastejší smer vetra, aby sa dalo určiť o akú zmenu drsnosti, respektíve zmenu rýchlostí vetra sa jedná.

Prechodová výška ale nehovorí nič o rýchlostiach ani o ich výpočte. Je však účelné ju poznať, alebo aspoň vedieť že existuje. Ako je z obrázku 3.5 viditeľné, v oblasti prechodovej výšky je zo začiatku spravidla nižšia rýchlosť prúdenia a teda nie je vhodné umiestňovať veterné zariadenie do oblastí touto výškou ovplyvnených, naopak nad touto výškou rýchlosť prúdenia rastie a teda má pozitívny vplyv umiestňovať veterné zariadenia nad túto hranicu. Ako je tiež viditeľné z obrázku 3.6, prechodová výška so vzdialenosťou od zmeny drsnosti vždy rastie, pretože novo vznikajúci profil čo sa týka výšky od povrchu čoraz viac a viac prevláda nad starým pri danej zmene drsnosti. Z energetického a ekonomického hľadiska teda nebude mať veľký význam zvyšovať umiestnenie zariadenia, pokiaľ sa zvyšuje umiestnenie len do prechodovej výšky, kde sa rýchlosť príliš nezvyšuje a všeobecne je nízka. Zoberme si príklad ako uvádza zdroj [6], pri prechode prúdenia zo zalesnenej oblasti na lúku bude vo vzdialenosti 100 m od tejto zmeny prechodová výška 14,5 m. Na hranici zmeny je táto výška oveľa menšia a teda je vhodnejšie umiestniť zariadenie hneď na hranicu zmeny drsnosti, kde je rýchlosť vyššia (to koniec koncov vyplýva aj z obrázku 3.5).

3.3 Vplyv osamotených prekážok na prúdenie vzduchu

Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim prúdenie sú okrem drsnosti povrchu, ktorá je celistvá aj rôzne prekážky, napríklad vysoké budovy, osamotené stromy... Ich vplyv je ale ťažké zhodnotiť, pretože záleží od vzdialenosti od inštalácie, ale aj smeru vetru, ktorý prevláda. Samozrejme, že najnevhodnejšie je umiestnenie priamo za prekážkou pri smere vetra, ktorý vedie cez prekážku priamo na zariadenie.

Vplyv prekážok na chod zariadenie je dvojaký. V prvom rade, ako zdroj [6] uvádza, klesá rýchlosť za prekážkou až o 40% vo vzdialenosti za prekážkou rovnej päť-násobku výšky prekážky (budova, lesný pás). Ak je prekážka rovnako široká ako vysoká, dá sa predpokladať pokles rýchlosti o 20%.

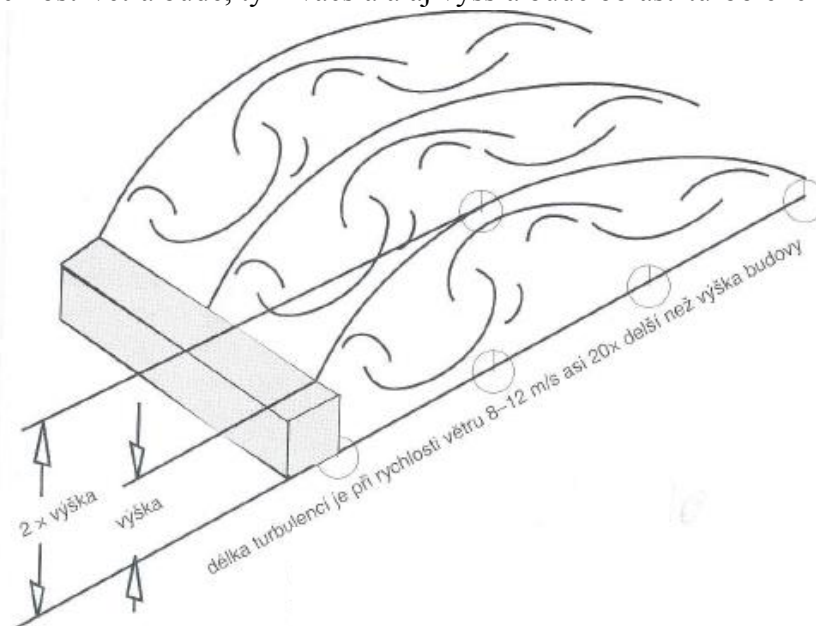
Druhým vplyvom je zmena smeru alebo lepšie povedané zmena režimu prúdenia v blízkosti prekážky. Vo voľnom priestore sa dá predpokladať laminárne prúdenie, to znamená, že rôzne vrstvy s rôznou rýchlosťou sa paralelne posúvajú bez vytvorenia výrazných vírov. V blízkosti povrchu, kde sa prúdu stavajú do cesty prekážky nemožno predpokladať laminárne prúdenie, iba ak tak pri veľmi nízkych rýchlostiach. Pri obtekaní týchto telies sa prúd snaží týmto prekážkam prispôbiť a teda sa rôzne stáča, víri a rýchlosť nemá len smer hlavného prúdu, teda má zložky aj kolmé na ňu. Hovoríme, že prúdenie je turbolentné. Takto vzniká turbolentné prúdenie, a zmeny rýchlosti vplyvom týchto turbolencií sú rozpoznateľné ešte vo vzdialenosti päť-násobku výšky prekážky, kde sa rýchlosť môže meniť aj o 25% svojej hodnoty (vzhľadom na smer). [13] Turbolencie neovplyvňujú dobre na veterné zariadenie, keďže znižujú jeho výkon. Existujú však aj zariadenia, ktoré turbolentné prúdenie dokážu zachytávať a spracovávať, turbolencie však vždy znížia účinnosť zariadenia, záleží však na type veterného stroja o koľko sa táto účinnosť premeny energie zníži, o tom však v ďalších kapitolách.

3.3.1 Turbulencie vznikajúce v okolí prekážky

Ako už bolo spomínané, turbolentné prúdenie v prípade tejto práce vzniká, keď sa prúdu vzduch postaví do cesty prekážka (budova). Teleso potom nebude vzduchom obtekané plynule, ale za telesom sa vytvoria víry. Je dôležité podotknúť, že turbolentné prúdenie pri obtekaní telesa vzniká až pri istej medznej rýchlosti. Toto prúdenie je charakteristické tým, že molekuly vzduchu sa v ňom neposúvajú len paralelne ale aj naprieč hlavným prúdom, prípadne aj proti nemu. Veterné zariadenia postavené v oblasti turbolencií nebudú fungovať úplne ideálne, keďže sú navrhnuté na istú rýchlosť a smer vetru. Už kapitola 3.1 konkrétne obrázok 3.5 pojednáva o tom, ako sa pri zmene drsnosti povrchu mení rýchlostný profil a že nie je úplne ideálne postaviť veterné zariadenie v oblasti prechodovej výšky z dôvodu zmien v prúdení vplyvom novo vznikajúceho rýchlostného profilu. Prechodová výška a teda zmena rýchlostných profilov nehovorí nič o turbulenciách, dáva však predstavu o tom, do akej výšky je ovplyvnené prúdenie relatívne malou zmenou prekážok na povrchu.

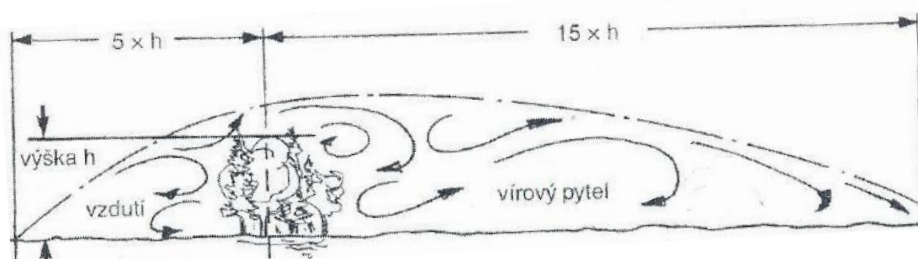
Niečo podobné vzniká aj pri obtekaní prekážok pri vzniku turbolencií. Ak si predstavíme prekážku ako hranatú budovu rýchlosť bude ovplyvnená nie len pred prekážkou, ale aj za ňou. Samozrejme, prúdenie bude ovplyvnené aj do istej výšky.

Čo sa ovplyvnenia smerom do výšky týka, záleží na počte prekážok za sebou, prípadne dĺžke prekážky v smere vetra. V prípade viacerých prekážok za sebou je ovplyvnenie výšky značné a dá sa predstaviť ako už popisovaný prípad zmeny drsnosti povrchu, teda už za prvou prekážkou bude narastať medzná výška, kde sa budú vyskytovať turbulencie a bude v nej vznikať nový rýchlostný profil. Výška ovplyvnenia teda koniec koncov záleží na počte prekážok ako aj na rýchlosti prúdenia. Pri osamotej prekážke bude situácia trochu iná. O mechanizme medznej výšky a tvorbe nového profilu sa nedá uvažovať. Podľa zdroja [13] môže výška turbolentnej oblasti pri prúdení okolo osamotej prekážky dosiahnuť výšku rovnú dvojnásobku výšky prekážky. Uvedené číslo je uvažované pri rýchlosti vetra rovnej 10 m/s. Čím vyššia rýchlosť vetra bude, tým väčšia a aj vyššia bude oblasť turbolencií.



Obr. 3.7 Výška oblasti turbolencie vznikajúcej pri istej rýchlosti vetra pri obtekaní hranatej budovy. [13]

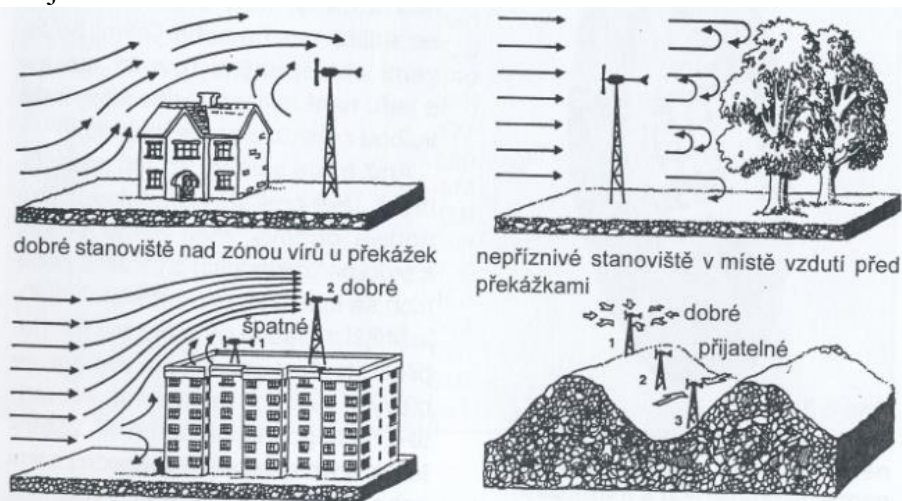
Ovplyvnenie pred a za prekážkou všeobecne tiež závisí na konkrétnej rýchlosti vetra a tvaru prekážky. Oblasť pred prekážkou je menšia a nazýva sa oblasť vzdutia. Oblasť za prekážkou je až štyrikrát väčšia ako oblasť pred prekážkou a nazýva sa oblasť turbolencií. Dá sa predpokladať, že najturbolentnejšie miesto je priamo za prekážkou, kde môže mať rýchlosť dokonca opačný smer z dôvodu vírenia. Miera turbolencií potom s pribúdajúcou vzdialenosťou za prekážkou klesá, až napokon úplne vymizne. Presný popis veľkosti ovplyvnenej oblasti k dispozícii nie je, existujú teda iba približné rozmery tejto oblasti uvedené publikáciami [6] a [13], ktoré sú však len pre istú rýchlosť vetra a nedávajú úplný prehľad danej oblasti. Je však nutné si uvedomiť, akých rozmerov môžu turbulencie a rýchlostne ovplyvnená oblasť dosiahnuť.



Obr. 3.8 Oblasť turbolencií pred a za prekážkou pri istej rýchlosti vetra. [13]

Kvantifikovať a popísať matematicky túto oblasť, teda určiť závislosť rozmerov ovplyvnenej oblasti na jej výške a rýchlosti vetra by bolo značne náročné, preto na popis ovplyvnenej oblasti je využitá simulácia prúdenia pomocou špeciálneho softwaru, kde je možné sledovať vplyv rýchlosti a tvaru prekážky na prúdenie vzduchu okolo nej. Výsledky simulácie sú uvedené nižšie v kapitole.

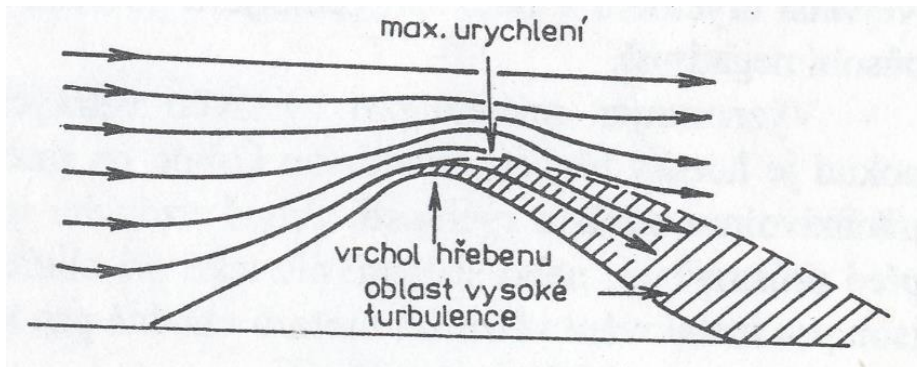
Pre veterný stroj je oblasť turbolencií značne nevhodná ako sa už spomína aj zo začiatku kapitoly, aj keď niektoré stroje dokážu turbolentné prúdenie zachytávať. Je však oveľa výhodnejšie umiestňovať veterný stroj nad oblasť turbolencií a ovplyvnenia z dôvodu priemerne vyšších rýchlostí. Obrázok 3.9 ukazuje voľby stanoviska vzhľadom na túto oblasť a to vhodné ako aj nevhodné.



Obr.3.9 Voľby stanoviska veterného stroja vzhľadom na oblasti turbolencií a ovplyvnenia vetra. [6]

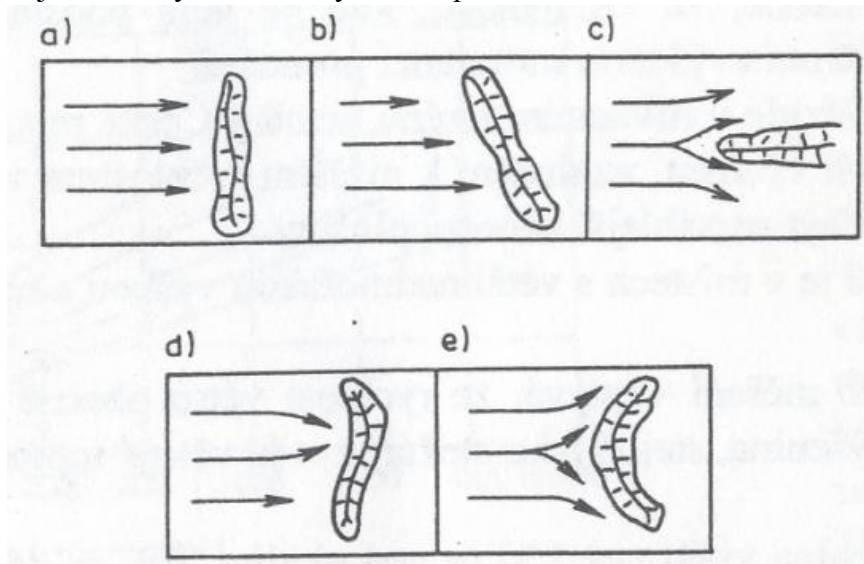
3.3.2 Veterná situácia na horách a vyvýšeninách

Lepšia veterná situácia sa nachádza v oblastiach s vyššou nadmorskou výškou. Rýchlosť vetru všeobecne narastá s nadmorskou výškou. Podľa zdroja [6], v ktorom je uvedené, že pokiaľ je nerovnosť vysoká oproti okolitému terénu aspoň o 150 metrov ruší sa aj vplyv nočného chladenia, kedy sa chladný vzduch v noci zhromažďuje v nížinách a oddeľuje sa od prúdenia vo vyšších vrstvách, teda zariadenia postavené nad touto vrstvou pracujú aj v období takzvaného ranného bezvetria. Ďalšou výhodou umiestnenia na kopci je aj urýchlenie prúdenia blízko hrebeňa kopca, kde sa prúdnicice zhusťujú a teda rýchlosť vetra narastá.



Obr. 3.10 Urýchlenie vetru na horskom hrebeni [6]

Vzhľadom na uvedené skutočnosti, je vyvýšenina ideálna na stavbu veterného zariadenia. Ohľadom rýchlostí je však dôležité aj natočenie vyvýšeniny voči prúdu vzduchu. Ideálnym prípadom je orientácia kolmo na smer prúdu, pretože prúd musí cez prekážku prejsť. Naopak ak by bola orientácia vyvýšeniny pozdĺž smeru prúdu, prúd ju bude obchádzať po stranách a nedôjde k tak výraznému urýchleniu prúdu vzduchu.



Obr. 3.11 Vplyv orientácie horského hrebeňa na prevládajúci smer vetru a jeho tvaru na vhodnosť umiestnenia veterného zariadenia. a),b),d) vhodné tvary, c),e) menej vhodné tvary [6]

3.4 Popis průdenia v meste a mestská medzná vrstva

Prúdenie v meste má samozrejme svoje špecifiká, dá sa predpokladať, že toto prúdenie je veľmi zložitá a že jeho popis je takmer nemožný. Pri istom zjednodušení a hlavne v istom zväčšení mierky sa isté zákonitosti prúdenia dajú zovšeobecniť. Rýchlostný profil prúdenia vstupujúceho do mesta sa dá napísať podľa už známeho vzťahu (3.1)

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n$$

Keď sa prúd vzduchu dostane do mesta, prispôbuje sa mestskej drsnosti povrchu a rýchlostný profil mení svoj tvar. Vytvorí sa vonkajšia medzná vrstva, ktorá oddeľuje pôvodný rýchlostný profil teda nezasiahnutú oblasť s tou zasiahnutou, vnútri zasiahnutej oblasti sa na začiatku rýchlosť radikálne oproti pôvodnému profilu zmení. Medzi zasiahnutou a nezasiahnutou oblasťou však nie je pevná hranica, tomuto prechodu sa hovorí tranzitná oblasť a je ťažké stanoviť jej rozmer. Ak je však mestská oblasť s konštantnou drsnosťou dost dlhá (v smere vetra), zasiahnutá a nezasiahnutá oblasť sa spoja a vytvoria lokálne prispôbený nový profil, rešpektujúci aerodynamické vlastnosti mesta. [54]

3.4.1 Popis plne rozvinutého mestského rýchlostného profilu

Ako už bolo povedané, plne rozvinutý mestský profil sa vyvinie až po istej dobe, kedy odznejú prechodové deje a zasiahnutá a nezasiahnutá oblasť sa plynule spoja a vytvoria tak nový profil. Tento dej sa však ustáli až po istej vzdialenosti od kraja mesta.

Plne rozvinutá vrstva skladá zo štyroch častí, respektíve štyroch vrstiev. Najspodnejšia vrstva je vrstva, ktorá obsahuje samotné obydlia, ulice...Prúdy v tejto vrstve sú utvárané hlavne tlakovými rozdielmi na náveternej a záveternej strane budov. Výška tejto vrstvy je zhruba do výšky samotných budov. Pre túto vrstvu sa analyticky nedajú vytvoriť modely rýchlostných profilov, pretože veľmi záleží na tvaroch budov a ich rozmiestnení. Prúdenie v týchto miestach je komplikované, trojdimenzionálne. [54]

V istej výške nad najspodnejšou vrstvou sa nachádza vrstva, kde je prúdenie už dvojdimenzionálne. Hybnosť v tejto vrstve je silne ovplyvnená horizontálnymi šmykovými napätiami danými trením v spodnejších častiach tejto vrstvy. Rýchlosť prúdenia sa dá popísať vzťahom

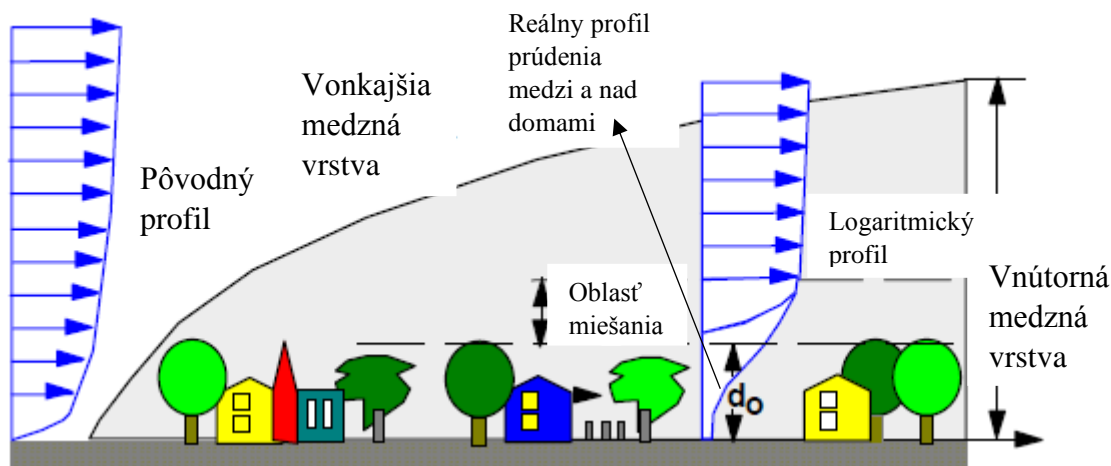
$$\frac{v}{v_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{z - d_{profil}}{z_0} \quad [-] \quad (3.5)$$

Kde κ [-] je Karmanova konštanta, väčšinou rovná 0,4, z_0 [m] je výška drsnosti povrchu, d_{profil} [m] je výška posunu profilu (z_0 ani d však nie sú presnými výškami budov, sú len istým násobkom priemernej výšky budov H) a $v_* = \sqrt{\tau_{šmyk}/\rho}$, kde $\tau_{šmyk}$ [Pa] je horizontálne šmykové napätie a ρ [kg/m³] je hustota vzduchu. Hlavným rozdielom medzi najspodnejšou vrstvou a vrstvou danou logaritickým profilom je v silách pôsobiacich na vzduch.

V najspodnejšej vrstve na vzduch pôsobia tlakové sily vyvolané obtekaním vzduchu okolo prekážok, kdežto vo vrstve danej logaritickým profilom na vzduch pôsobia len horizontálne šmykové napätia medzi jednotlivými menšími vrstvami vzduchu s rozličnou rýchlosťou. [54]

Medzi najspodnejšou vrstvou a vrstvou danou logaritickým profilom je však ešte jedna vrstva, nazýva sa vrstva miešania. Vrstva miešania je vrstvou, kde sa trojdimenzionálne

prúdenie postupne transformuje na dvojdimenzionálne s konštantným atmosférickým tlakom. Stanovenie výšky (hrúbky) tejto vrstvy je však analyticky znova veľmi ťažké, ale je dokázateľné, že záleží na konfigurácii budov. Veľmi zjednodušene o tom pojednáva zdroj [54], kde sú uvedené všetky koeficienty potrebné na doplnenie vzťahu 3.5 podľa konfigurácie budov. Jedná sa však o odhady dané istým zjednodušením.



Obr. 3.12 Zjednodušený pohľad na mestskú medznú vrstvu spolu s jej časťami [54]

Ako ukazuje obr. 3.12, vzťahom 3.5 sa dá dobre popísať vrstva, ktorá je vzdialená od prekážok v istom rozmedzí. Popis vrstvy miešania je však veľmi obťažný, takisto aj popis najspodnejšej vrstvy, kde sa nachádzajú prekážky. Avšak ako ukazuje obr. 3.12 reálny rýchlostný profil môže vyzeráť inak ako udáva logaritmický profil, medzi domami a vo vrstve miešania, môže byť rýchlosť výrazne odlišná. A práve táto oblasť, predovšetkým oblasť miešania je predmetom záujmu práce, keďže malá veterná turbína by hlavne z bezpečnostného a ekonomického hľadiska nemala výrazne vytrčať nad strechy budov (nemusí to byť o výške nad budovami ako skôr o vhodnom umiestnení turbíny na streche, pokiaľ sa jedná o využiteľnosť).

Popisom prúdenia vzduchu sa zaoberá veľmi veľké množstvo vedeckých prác, nie sú však pre túto prácu príliš využiteľné, pretože popisujú prúdenie vzduchu vo väčších výškach nad prekážkami, vo výškach do ktorých malá veterná turbína nebude nikdy inštalovaná. Presný pohľad na prúdenie nad budovami je veľmi ťažké vytvoriť, určiť alebo namerať. Prúdenia nad budovami alebo domami je však možné v istom zmysle zovšeobecniť aspoň do istej miery, preto bude na popis tohto prúdenia nad a okolo budov využitá vlastná numerická simulácia.

3.5 Simulácia prúdenia v mestskom prostredí

Keď sa odmyslia zložité mestské budovy (historické, architektonické...) tak sa mestské prostredie dá zjednodušiť na isté typické budovy. Keďže malá veterná turbína je určená na predovšetkým na budovy obývané, prípadne isté priemyselné podniky a administratívne budovy (veternú turbínu si je asi ťažko predstaviť na streche kostola) dá sa tento tvar budov zjednodušiť na hranatý tvar v prípade priemyselných podnikov a administratívnych budov. A na hranatí tvar spolu s tvarom obydlí so strechou v tvare písmena A pre domácnosti. Pre tieto budovy sa potom dá vytvoriť popis prúdenia v ich okolí. Načo však využívať zložitý analytický popis, keď v dnešnej dobe sa dá pomocou vhodného softwaru dané prúdenie

v okolí budov simulovať pomocou numerických modelov. Výsledkom takéhoto modelu by mal byť obraz o tom, ako vyzerá prúdenie okolo takýchto typických budov celkovo, teda aj so spomínanou prízemnou medznou vrstvou a aj s vrstvou miešania, ktorých analytický popis je značne náročný. Samozrejme, aj v prípade numerickej simulácie je nutné použiť isté zjednodušenia, ktoré sa líšia od reality, o tom však v nasledujúcich kapitolách.

3.5.1 Princíp numerických simulácií

Princíp numerických simulácií je značne zložitý, špeciálne zložitý ak sa jedná o simuláciu súvisiacu s prúdením. Nie je predmetom práce vysvetliť detailný princíp, ako takýto numerický model funguje. Je však na mieste uviesť niekoľko základných pojmov ako aj postupu, ako sa tento numerický model vytvára.

1. krok: *Pre-processing*

Úplne prvým krokom je popis geometrie oblasti, ktorú modelom skúmame. Je dôležité si uvedomiť, že v prípade prúdenia je to oblasť okolo fyzických telies. Geometriou oblasti sa teda v zjednodušení myslí vytvorenie akéhosi veterného tunelu, teda geometria modelu obsahuje obrys telies, okolo ktorých prúdenie skúmame a hlavne samotný uzavretý priestor, kde bude prúdiť dané médium. Ďalším krokom je tvorba výpočtovej siete, kedy sa daný skúmaný objem rozdelí na konečný počet elementov, pre ktoré sa neskôr budú riešiť príslušné rovnice. Jedná sa o diskreditáciu objemu, kedy sa zložitá geometria rozdelí na menšie opísateľné časti, s ktorými vie software pracovať. V ďalšom kroku sa vyberú výpočtové modely na základe ktorých bude výpočet prebiehať, jedná sa o definíciu fyziky modelu. Pre predstavu, existuje veľa spôsobov ako popísať turbolentné prúdenie, vhodnou voľbou modelu turbolencie sa získa správne riešenie problému. V poslednom kroku sa nastavujú počiatkové podmienky (napríklad aká je teplota, tlak na začiatku výpočtu v celom objeme) a tiež sa nastavujú okrajové podmienky, nimi sa pre predstavu určuje čo je nepriestupná stena, čo je vstupná a výstupná prietoková plocha.

2. krok: *Solver*

Keďže je už zadaná oblasť, modely fyziky, počiatkové a okrajové podmienky, je definované všetko, čo je potrebné na samotné riešenie. Riešenie používa rovnice ako zákon zachovania hmoty, energie a hybnosti (Navies-Stokesova rovnica). Analytické riešenie týchto rovníc je nemožné a preto sa využíva numerické riešenie a postup riešenia je iteračný. Tieto metódy sú napríklad metóda konečných prvkov, metóda konečných objemov... Postup výpočtu je naprieč zadaným objemom, pričom hodnoty veličín v konkrétnych prvkoch závisia na hodnotách v okolitých prvkoch a postupne menia svoje hodnoty, až výpočet (možno) skonverguje a teda sa riešenie dá pokladať za správne.

3. krok: *Post-processing*

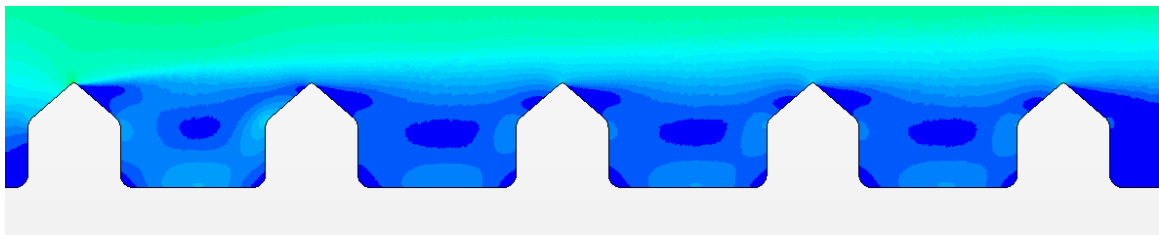
V tomto momente sú už vypočítané všetky veličiny, ktoré popisujú prúdenia v danej oblasti skúmania. Vhodným prostriedkom vizualizácie sa dajú zobraziť alebo vyhodnotiť. Dajú sa tiež vyhodnotiť niektoré veličiny, ktoré s prúdením nesúvisia, ale na základe získaných hodnôt sa dajú v tomto momente dopočítať.

Správnosť riešenia sa dá vyhodnotiť viacerými spôsobmi. Najzákladnejšou podmienkou je konvergencia iteračného riešenia, výsledky musia byť skonvergované do istej presnosti. Existujú však aj iné ukazatele, ktoré svedčia o správnosti riešenia, napríklad pomocná veličina Wall Y+.

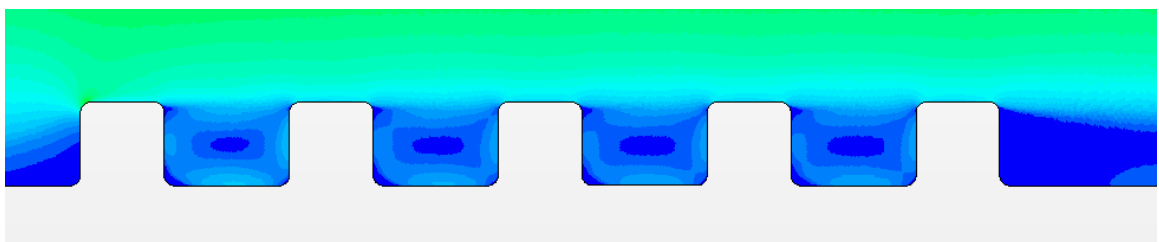
3.5.2 Nastavenie geometrie modelu

Geometriou modelu sa myslí vytvorenie spomínaného pomyselného veterného tunelu, ktorý obsahuje vstup a výstup prúdiaceho vzduchu, samotné prekážky a okolité steny, ktoré prúdenie usmerňujú. Celý model je vytvorený ako 2D, čo môže prinášať rôzne úskalia, ktoré budú spomenuté nižšie. Prináša však dôležité poznatky, ktoré platia pre zvolené geometrie domov. Veľkou výhodou 2D modelu je jeho jednoduchosť, dá sa na ňom veľmi ľahko nastaviť fyzika modelu takisto ako aj sieť, na ktorej sa veličiny prúdenia počítajú. 3D model je neuveriteľne náročný na výpočtový výkon, pre príklad uvádzam vlastnú skúsenosť, kedy stolový počítač v počítačovej učebni napočítal len 200 iterácií za 5 dní výpočtu, pričom pri zjednodušení na 2D výpočet pri zachovaní dobrej výpočtovej siete to počítaču trvalo necelú pol hodinu na 2000 iterácií.

Samotná geometria prekážok, teda domov bola vytvorená na základe priemernej geometrie dvojposchodového domu a to buď so strechou v tvare písmena A, alebo horizontálnou strechou.



Obr. 3.13 Dom so strechou v tvare A použitý na simuláciu [autor]
(rozmery-výška domu $H=8\text{m}$, šírka domu 7m , strecha začína na 5m od zeme, pre nutné zjednodušenie geometrie sú hrany domu zaoblené s polomerom $R=1\text{ m}$ okrem vrcholovej hrany strechy ktorá je zaoblená s polomerom $R=0,3\text{ m}$)



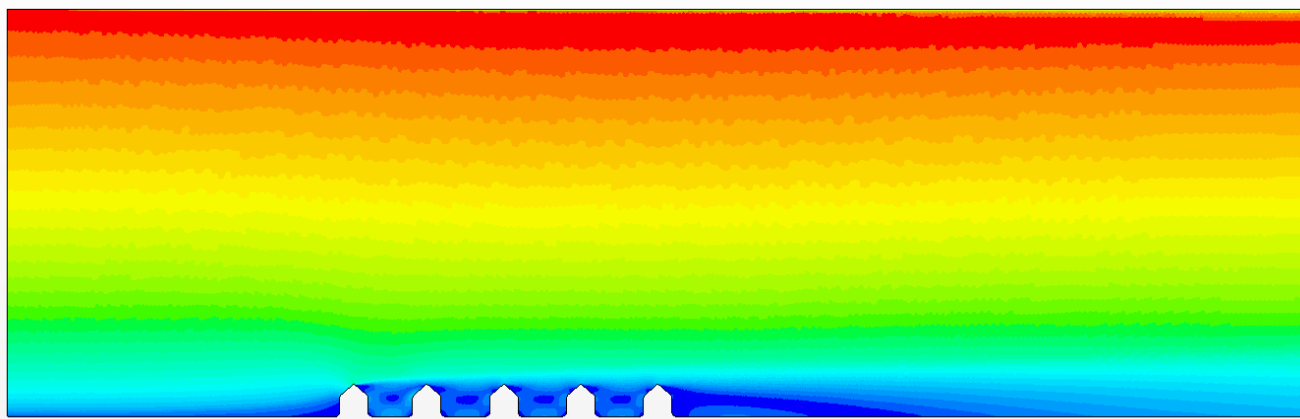
Obr. 3.14 Dom s horizontálnou strechou [autor]
(rozmery- výška domu $H=8\text{ m}$, šírka- 7m , zaoblenia hrán $R=1\text{ m}$)

Hrany domu museli byť zaoblené z dôvodu zjednodušenia, program vykazoval veľkú chybovosť pokiaľ boli všetky hrany domu nezaoblené, jedná sa však o zjednodušenie, ktoré by nemalo vo veľkej miere ovplyvniť prúdenie nad strechami, teda v oblasti záujmu.

Oblasť, ktorou vzduch prechádza, teda pomyselný veterný tunel musel byť tiež rozmerovo nadimenzovaný tak, aby domy na spodnej strane len veľmi málo ovplyvňovali prúdenie vo väčších výškach, preto musel byť tunel dostatočne vysoký. Istú predstavu o rozmeroch ovplyvnenej oblasti vzduchu pri obtekaní domov dáva obr. 3.8, ktorý uvádza, že vzdutie pred prekážkou môže dosahovať dĺžky $5xH$ (H =výška prekážky) a vírový pytel môže dosahovať dĺžky $15xH$. Takúto vzdialenosť musí mať minimálne tunel, pokiaľ je potrebné skúmať oblasť ovplyvnenia prúdenia vzduchu. Čo ale s výškou tunela? Tá by teoreticky nemusela byť extrémne veľká. Čo sa ale deje pri 2D simulácii je to, že prúd vzduchu nemôže ísť okolo prekážky a teda prúdi len ponad ňu, čo v realite vystihuje práve stred domu, na krajoch domu bude prúd vzduchu usmernený po jeho krajoch. Preto je nutné aj výšku veterného tunela určiť tak, aby bola dostatočne vysoká, aby zrýchlenie vzduchu, ktorý preteká cez zúženú oblasť nad domov nebolo tiež ovplyvnené hornou stranou tunela, teda zrýchlenie vzduchu je možné len nad domom, vo vyšších výškach musí byť rýchlosť vzduchu nezmenená, potom je takýto tunel čo najpodobnejší realite, kedy to, že sa prúdenie presunie nad domy neovplyvní prúdenie vo vyšších výškach.

Z takéhoto poznatku tiež vyplýva, že nemá význam v 2D simulácii používať príliš vysoké budovy, kedy sa dá predpokladať, že veľká časť prúdenia obteká prekážku po jej bokoch, nie ponad ňu. Preto ostane 2D simulácia len pri dvojposchodových domoch, maximálne budú použité vyššie domy len pre ukážku toho, ako sa prúdenie chová a či vôbec zodpovedá realite.

Veterný tunel by mal mať teda minimálne rozmery $5xH$ pred prekážkami, $15xH$ za prekážkami, a $5xH$ na výšku. V simulácii sú však rozmery o niečo väčšie, aby sa mohlo prúdenie sledovať aj za oblasťou vírového pytla, pretože prúdenie je do istej miery ovplyvnené aj za hranicou tejto oblasti.



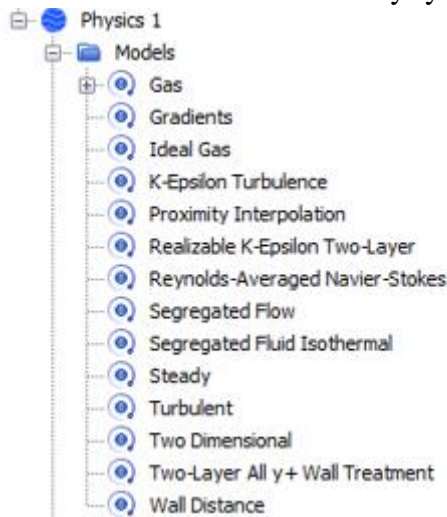
Obr. 3.15 Veterný tunel, v ktorom je umiestnená rada domov, pričom rozteče domov sú 10 m [autor]

Ako je vidieť z obr. 3.15 ktorý zobrazuje veľkosť rýchlostí prúdenia, nad domami je rýchlosť vo vyšších výškach ovplyvnená a nie je konštantná. K tomuto javu však dochádzalo aj keď bola výška tunela oveľa vyššia (je to spôsobené tým, že horná strana tunela je modelovaná ako stena, teda má istú drsnosť a pri prúdení pri nej sa prúdenie spomaľuje, čo spôsobuje odklon vyšších rýchlostí-červených smerom dole). Veľkosť tohto ovplyvnenia však nie je veľká a preto ju pokladám za nepodstatnú hlavne z dôvodu že predmetom záujmu bude oblasť tesne nad domami, nie vo vyšších výškach.

3.5.3 Modely fyziky simulácie

Popis a riešenie prúdenia je veľmi zložitý. Takisto je to zložitý problém aj pre počítač, preto sa pri výbere modelov fyziky simulácie udávajú riešiču isté zjednodušenia a predpoklady. Napríklad sa jedná o to, aký typ prúdenia sa dá očakávať, laminárny alebo turbolentný. Ak sa zadá rovno riešiču, že prúdenie bude veľmi pravdepodobne turbolentné vyberie si podľa toho rovnice a postupy, podľa ktorých rýchlejšie a správnejšie problém vypočíta. To isté platí napríklad aj pre model plynu aký sa zadáva, ak sa neočakávajú výrazne tlakové rozdiely dá sa riešenie zjednodušiť na riešenie s ideálnym plynom, čo riešiču výrazne zjednoduší prácu.

Sú však aj voľby modelov, ktoré sa nedajú na začiatku hneď odhadnúť a je nutné postupovať podľa odporúčaní alebo metódou pokus-omyl. Pri zlej voľbe istého modelu fyziky je veľmi pravdepodobné, že riešenie neskonverguje. Je tiež pravdepodobné, že riešenie bude ľudsky povedané- divné, nezmyselné. Pri každom probléme sa dá očakávať istý výsledok. Pokiaľ sa zdá, že riešenie nie je také ako by sa dalo očakávať, je možné že je zle zvolený model fyziky a riešič si na jeho základe nevie poradiť pri počítaní. Je na skúsenosti človeka, ktorý s programom pracuje správne odhadnúť a zvoliť modely fyziky.



Obr. 3.16 Modely fyziky využité pri simulácii [autor]

Gas- týmto modelom sa definuje skupenstvo, v tomto prípade plynné s vlastnosťami vzduchu

Ideal gas- v modely sa dajú očakávať len malé rýchlosti a malá rozdiely tlakov voči atmosférickému tlaku, preto je pre zjednodušenie uvažovaný ideálny plyn, teda vplyv stlačiteľnosti sa zanedbáva

K-Epsilon Turbulence- model turbolencie nie je ľahké zvoliť, podľa doporučení však tento model viac vyhovuje prúdeniu, ktoré je vo voľnom priestore a má nižšie rýchlosti, čo tomuto problému obtekania domov vyhovuje. K tomuto modelu patrí aj model *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*, ktorý tiež popisuje a rieši turbolentné prúdenie

Segregated flow- tento model tiež viac vyhovuje viac prúdeniu, ktoré je relatívne pomalé

Segregated fluid isothermal- tento model zjednodušuje riešenie tým, že sa nerieši prenos tepla medzi vzduchom (ak by mal rozdielne teploty)

Steady- tento model pracuje s problémom tak, že sa rieši jeden konkrétny ustálený stav ku ktorému sa iteračne snaží riešiť dopočítať. Ak by pri obtekaní domov vznikali víry, ktoré by sa periodicky odtrhávali (čo pri istých rýchlostiach je možné) tak by bolo nutné zvoliť iný model časového priebehu, napríklad model unsteady (neustálený), alebo model harmonic unsteady (periodicky nestály- napr. pravidelné odtrhávanie od hrán)

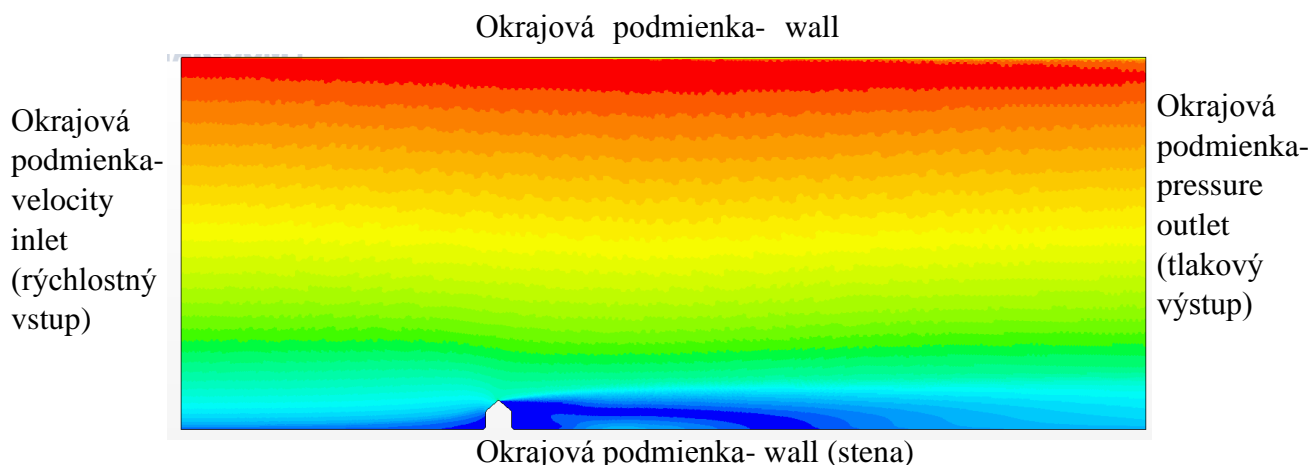
Turbolent- model charakterizujúci typ prúdenia, vo väčšine prípadov sa dá predpokladať turbolentné prúdenie

Two dimensional- určuje riešenie pre vytvorenú 2D geometriu

Ostatné nevysvetlené modely boli určené nie na základe voľby človeka, ale vyplývajú z voľby predchádzajúceho modelu a riešiť si ich volí sám ako doplnok.

3.5.4 Nastavenie okrajových podmienok

Pred samotným riešením daného prúdenia je nutné riešiču povedať, akým spôsobom má nakladať s okrajmi geometrie. Pri riešení prúdenia je nutné riešiču udať to, čo je nepriepustná stena s istou drsnosťou povrchu, čo je vstupná plocha prúdenia a čo je výstupná plocha prúdenia.



Obr. 3.17 Nastavenie okrajových podmienok modelu [autor]

Vstup- vstup je realizovaný na základe popisu prúdenia pri povrchu z kapitoly 3.1 a je zadaný ako exponenciálny profil zadaný vzorcom 3.1 a hodnotami priemernej rýchlosti vetra 5 m/s vo výške 10 m nad povrchom, čo odpovedá rýchlosti pri priemernom veternom dni. Zdroj [20] uvádza priemerné hodnoty rýchlosti vetra pre územie ČR na hodnote okolo 3 m/s, čo ale zahŕňa aj obdobia bezvetria, preto 5 m/s v 10 m nad zemnou je hrubý odhad rýchlosti vzduchu pri veternom dni (konkrétne dáta z meraní budú uvedené v kapitole 5). Tento rýchlostný profil je braný ako vstupný, teda hovorí o rýchlostiach, ktoré sú ešte pred prekážkami, teda pred mestom. Hodnota drsnosti povrchu bola zvolená ako čo najdrsnejšia z tab. 3.1 na hodnote $n=0,48$. Vstupný rýchlostný profil je teda zadaný v závislosti na výške nasledovne:

$$v = 5. \left(\frac{h}{10}\right)^{0,48}$$

Výstup- výstup je zadaný ako tlaková okrajová podmienka, teda udáva aký tlak je na výstupe z veterného tunelu. Pre simuláciu je to hodnota atmosférického tlaku $p_a = 101\,325$ Pa, keďže nie je dôvod prečo by mal byť tento tlak iný.

Steny- horná a spodná strana (spolu s domami) veterného tunela je realizovaná ako podmienka stena. Je teda pre prúdenie nepriepustná, má svoju drsnosť ktorá je zvolená len na veľmi nízkej hodnote, pretože vplyv drsnosti a tvaru povrchu je zahrnutý už v rýchlostnom profile, preto je pre simuláciu už drsnosť samotných stien nepodstatná. Inak by to bolo, keby bolo ťažké určiť rýchlostný profil. Drsnosť povrchu však jemne vplýva na konečný stav prúdenia, ako je viditeľné v pravom hornom rohu obr. 3.17, kedy je už viditeľný rozdiel rýchlostí pri stene a kúsok od steny, čo vôbec nepostihuje realitu, pre simuláciu je však dôležité aby horná stena neovplyvňovala spodnú stranu s domami, čoho je dosiahnuté (aj keď sa zdá, že sa prúdenie vo vertikálnom smere zmenilo aj v najvyššom bode nad domom, nemá s tým táto okrajová podmienka súvis- pri pokusoch zvýšiť výšku veterného tunela sa ukázalo, že takto vyzerá rýchlosť nad domami vždy)

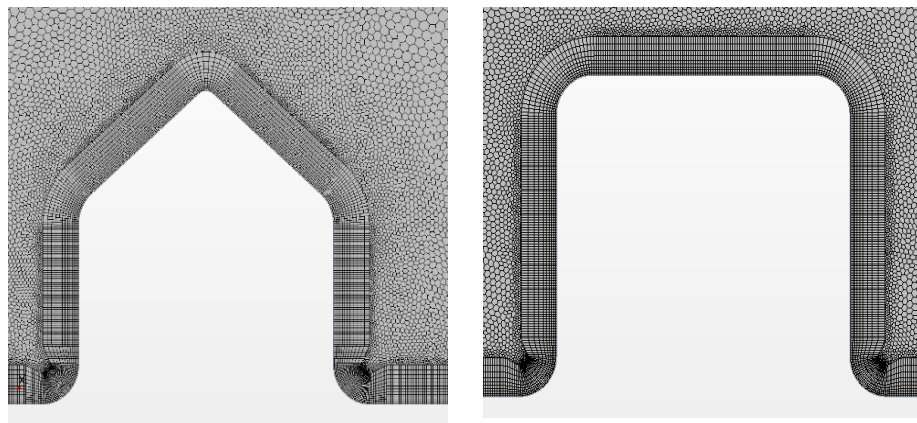
Počiatkové podmienky- počiatkové podmienky udávajú, aký je stav prúdenia na začiatku simulácie v celom objeme veterného tunela voči referenčným hodnotám. V danej simulácii však nebolo potrebné špecifikovať nijak inak počiatkové podmienky voči referenčným (atmosférický tlak, nulová rýchlosť prúdenia). Po spustení simulácie sa prúdenie rozširuje z okrajovej podmienky vstupu smerom do výstupu a postupne, s pribúdajúcimi iteráciami sa riešenie ustáľuje a teda konverguje ku konečnej podobe prúdenia nad domami.

3.5.5 Nastavenie výpočtovej siete

Výpočtová sieť je pre samotný výpočet veľmi dôležitá a predovšetkým na nej závisí, ako dobre výpočet skonverguje. V softwari sa dá nastaviť špeciálne výpočtová sieť pre medznú vrstvu, kde výpočet prebieha trošku inak, hrúbku tejto medznej vrstvy je však na začiatku nutné odhadnúť a po výpočte vyhodnotiť. Kvalitu výpočtovej siete v okolí povrchov udáva ukazateľ $Wall Y+$, ktorý pre zvolený model medznej vrstvy by mal vychádzať od 10 do 90, vo všeobecnosti čím menej tým lepšie. Ak teda tento ukazateľ víde v danom rozmedzí, potom je vystihnutie medznej vrstvy výpočtovou sieťou medznej vrstvy dobré a reálna medzná vrstva má zhruba hrúbku tejto časti siete. Ostatné časti geometrie ďalej od povrchov sú modelované pomocou mnohostenných prvkov (*polyheral mesh*). Tieto mnohosteny dobre vytvárajú sieť pri geometrii, ktorá je členitá, teda v okolí domov.

Najjemnejšia sieť na modely je samozrejme v tej oblasti, kde sa niečo deje a prúdenie má zložitý charakter, teda v tomto prípade v oblasti domov, ktorá je zároveň oblasťou záujmu. Nad domami už prúdenie nemá zložitý charakter a jemná výpočtová sieť už nie je potrebná. Jemnosť siete teda postupne rastie od spodku kde sa nachádzajú prekážky smerom hore.

Je tiež dôležité spomenúť, že výpočtu veľmi pomohlo to, že hrany domu sú zaoblené, sieť potom v okolí týchto hrán môže byť veľmi jemná, čo by v prípade ostrých hrán nebolo možné a sieť by tu bola príliš hrubá.



Obr. 3.18 Výpočtová sieť v okolí domov [autor]

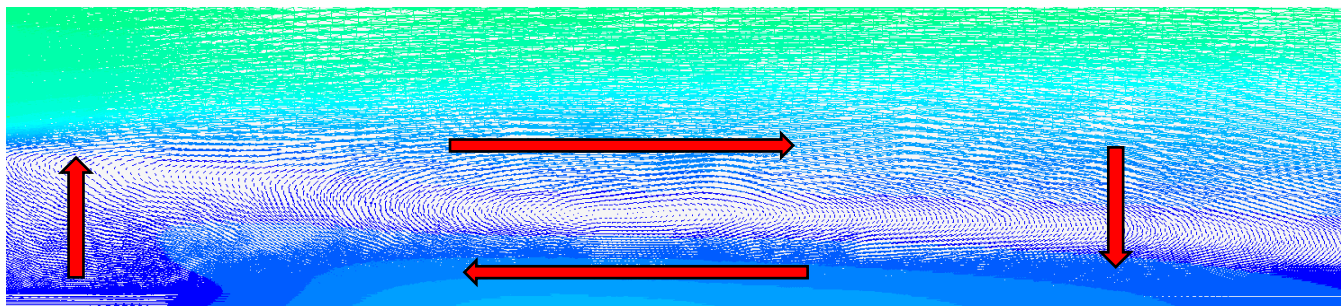
Na obrázku vidno aj rozdiel medzi obyčajnou sieťou a sieťou špeciálne určenou pre medznú vrstvu, na začiatku je nutné jej hrúbku odhadnúť, odhad bol určený na hodnotu 0,8 m, toto sa ukázalo ako veľmi zlé, pretože ukazateľ Wall Y+ nevyšiel dobre, preto bola hrúbka medznej vrstvy upravená na hodnotu 0,2 m.

Po vložení geometrie, nastavení modelov fyziky, vytvorení vhodnej výpočtovej siete sa môže prejsť k samotnému výpočtu, ktorý prebieha iteratívne až do takej doby, kým hodnoty chybovosti sledovaných veličín (reziduí) neklesnú na prijateľnú hodnotu (čo môže byť v stovkách až tisícoch iterácií).

Výhodou simulácie prúdenia je to, že po skončení výpočtu sa dajú základné veličiny prúdenia (rýchlosť, tlak, teplota...) zobraziť ihneď, pretože aby výpočet bol možný, musí riešiť tieto veličiny v každej iterácii a všetky spolu, pretože spolu súvisia a navzájom sa ovplyvňujú. Je teda len na tom, akú veličinu človek sleduje aby si ju vhodne zobrazil. Niektoré veličiny, sa ale musia ešte dopočítať po skončení výpočtu, jedná sa napríklad o sily pôsobiace na plochy a telesá alebo spomínaná pomocná veličina Wall Y+, tieto veličiny sa dopočítavajú až z výsledkov základných veličín riešenia prúdenia.

3.5.6 Vyhodnotenie simulácie pre osamotené prekážky

Ako už bolo naznačené v predošlých kapitolách, za osamotenou prekážkou vzniká oblasť turbulencií, konkrétne sa jedná o takzvaný vírový pytel. Za prekážkou sa teda v konečnom dôsledku vytvára jeden veľký vír. Najprv je teda vhodné sa pozrieť, čo vplýva na veľkosť tohto víru z hľadiska geometrie vybraných budov. V prípade budov s horizontálnou strechou sa bude meniť výška budovy a v prípade budovy so strechou v tvare A sa bude meniť sklon strechy.



Obr. 3.19 Vír vznikajúci za domov- vektorové pole rýchlostí [autor]

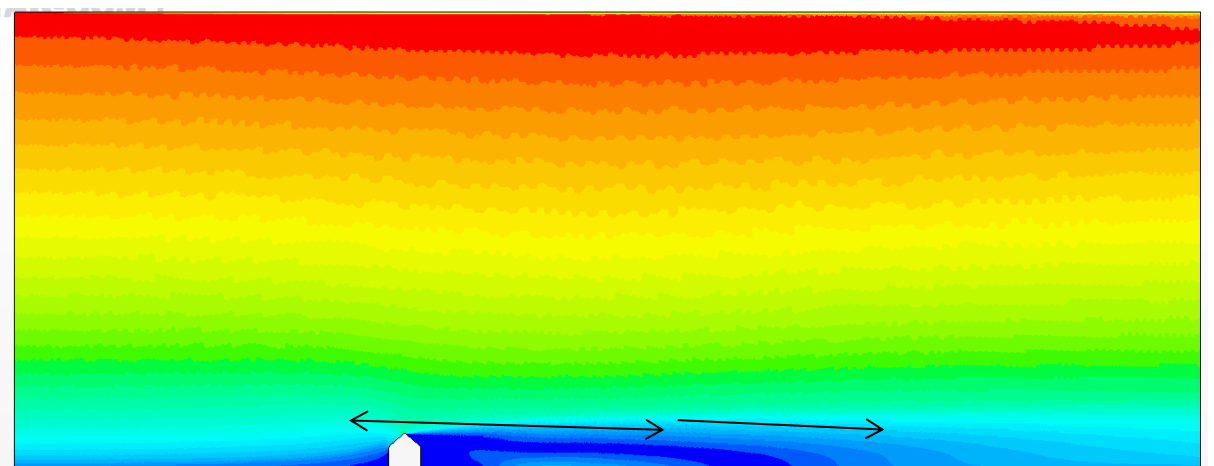
Tab. 3.2 Vplyv geometrie prekážok na veľkosť vírového pytla za prekážkou [autor]

Typ domu	Veľkosť víru [m]	Veľkosť víru k výške prekážky [m]
Hor. strecha 8 m	64	$8xH_8$
Hor. strecha 16 m	187	$11,6xH_{16}$
Hor. strecha 24 m	Viac ako 335	Viac ako $14xH_{24}$
A strecha plytká 8m	76	$9,5xH_8$
A strecha normál 8m	78	$9,75xH_8$
A strecha strmá 8 m	87	$10,8xH_8$

Ako je vidieť z tabuľky 3.2, najväčší vplyv na veľkosť víru za prekážkou má výška prekážky, táto závislosť však vôbec nie je lineárna. Je vidieť, že pokiaľ má byť veterná turbína umiestnená na mieste, kde je vzhľadom na prevládajúci smer vetra vyššia budova pred miestom inštalácie, je potrebná značná vzdialenosť od tejto budovy, aby sa rýchlosť vetra dostala aspoň na svoju pôvodnú hodnotu, pretože len samotný vír za ňou je značne rozľahlý.

Ďalším faktorom je sklon strechy, kde sa ukázalo, že najlepšie je, keď je strecha úplne rovná. Čím je strecha pri rovnakej výške domu strmšia, tým ďalej siaha vír za domom. Opäť, táto závislosť nie je lineárna, pretože pri plytkej streche sa strecha pri 8 metrov vysokom dome začína strecha na 6 metroch a vír je len trošku menší ako pri normálnej streche. Pri strmej streche a 8 metrov vysokom dome sa strecha začína na 4 metroch a vír je už viditeľne väčší ako pri normálnej streche.

Samotný vír však nie je jediná forma ovplyvnenia prúdenia za prekážkou, prúdenie je ovplyvnené prekážkou aj za oblasťou víra do značnej vzdialenosti. Poďme sa teda pozrieť na to, v akej vzdialenosti od domu sa rýchlosť vo výške 10 m vráti späť na svoju pôvodnú hodnotu 5 m/s.



Oblasť víru

Oblasť ovplyvnenia rýchlostí však pokračuje

Obr.3.20 Rozdelenie oblastí ovplyvnenia podľa oblastí víru a oblasti ďalšieho ovplyvnenia [autor]

Tab. 3.3 Vzďialenosť od domu, kedy sa prúdenie vo výške 10 m vráti na svoju pôvodnú hodnotu [autor]

Typ domu	Vzďialenosť vyrovnania rýchlostí vo výške 10 m [m]
Hor. strecha 8 m	Viac ako 215 m (4,2 m/s 215 m za domom)
Hor. strecha 16 m	Viac ako 245 m (3 m/s 245 m za domom)
Hor. strecha 24 m	Viac ako 335 m (0,3 335 m za domom)
A strecha plytká 8m	Viac ako 175 m (4 m/s 175 m za domom)
A strecha normál 8m	Viac ako 175 m (4 m/s 175 m za domom)
A strecha strmá 8 m	Viac ako 175 m (3,9 m/s 175 m za domom)

Ako je vidieť z tabuľky 3.3, vzdialenosť, kde by sa vo výške 10 m vyrovnala rýchlosť na pôvodnú hodnotu je väčšia ako dĺžka samotného veterného tunela. Pokiaľ by sa jednalo o prúdenie v meste, kde neprichádzajú do úvahy takéto veľké medzery medzi prekážkami, potom je nutné brať do úvahy trvalé porušenie pôvodného prúdenia v mestách. V najlepšom prípade je (horizontálna strecha) je nutné počítať s takmer 20% znížením rýchlosti aj vo vzdialenosti stoviek metrov za prekážkou. Opäť záleží na výške a tvare domu do akej vzdialenosti sa ovplyvnenie dostane. Obrázky 3.7 a 3.8 teda udávajú len približnú predstavu o tom ako sa chová prúdenie za budovami, keď udávajú, že oblasť turbulencií a ovplyvnenia je 15-20 krát väčšia ako výška budovy.

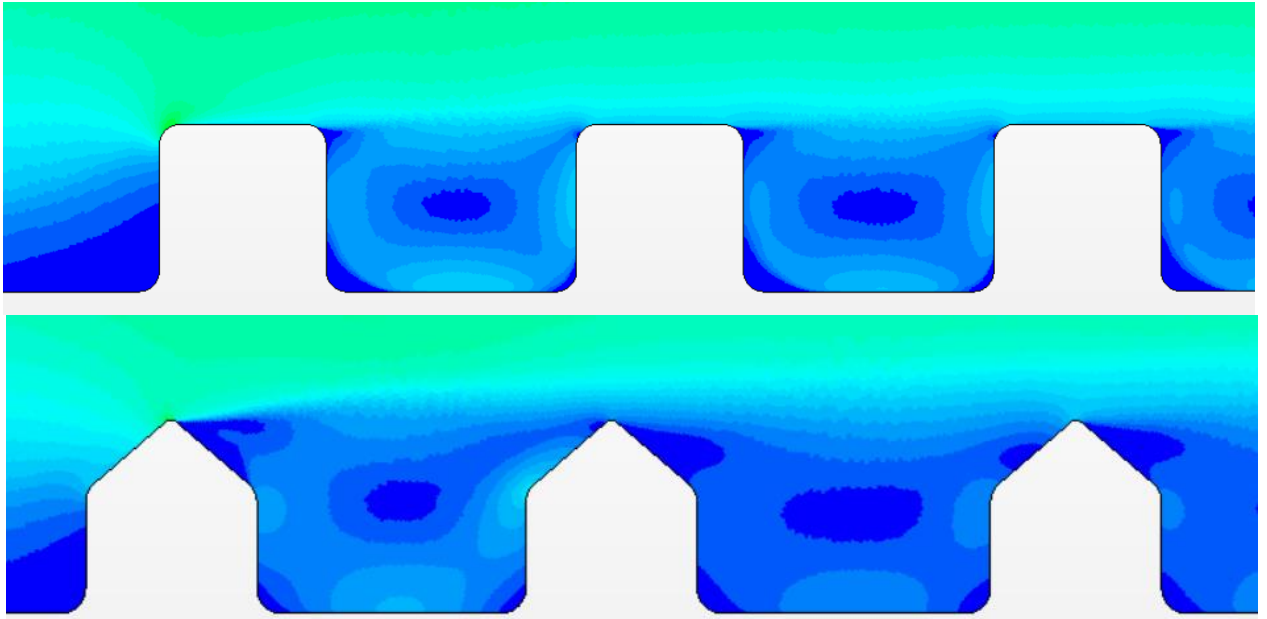
V mestách však len ťažko nájdeme také rozmedzia medzi budovami, aby pokryli oblasť víru za prekážkou, prípadne aj mohutnejšiu oblasť ovplyvnenia ešte za vírom. Preto je nutné pozrieť sa na prúdenie vzduchu nad radom domov, teda geometriou prekážok, ktorá je už v mestách oveľa častejšie.

3.5.7 Vyhodnotenie simulácie pre rad prekážok

Rad domov je už typickejší model prekážok pre mesto. Takýto rad domov sa dá očakávať predovšetkým na krajoch miest, prípadne sa o takomto modeli prekážok dá uvažovať v dedinách. Cieľom tejto simulácie bude vyhodnotiť rýchlosti a charakter prúdenia pri obtekaní radov domov a to vo výške v ktorej by mala byť nainštalovaná malá veterná turbína a teda vo výške, ktorú analytické vzorce len ťažko vystihujú pre jej zložitú a rôznorodú (viď. kapitola 3.4.1). Pre model boli znovu vybrané len geometrie typických domov a to dvojposchodové domy s horizontálnou strechou a domy so strechou v tvare A.

Vyhodnocovaná bude len horizontálna rýchlosť, keďže tuto rýchlosť zachytáva turbína a z nej potom odoberá energiu. Rýchlosť totiž hlavne v blízkom okolí stiech má zložitejší charakter a má aj vertikálnu zložku, ktorá sa na funkciu turbíny nepodieľa, pokiaľ uvažujeme turbínu s horizontálnou osou otáčania. Rýchlosť sa bude vyhodnocovať v štyroch výškach nad stredom strechy domu.

Tiež budú vyhodnocované rýchlosti až od tretieho domu, pretože prvý a druhý dom vykazujú dosť zložitý charakter prúdenia, pretože prúdenie tu má veľmi turbolentný charakter vplyvom rýchlej zmeny geometrie prietokovej oblasti. Aj pre výsledky dáva väčší zmysel vyhodnotiť rýchlosti až pri domoch, ktoré sú hlbšie v mestskom prostredí.

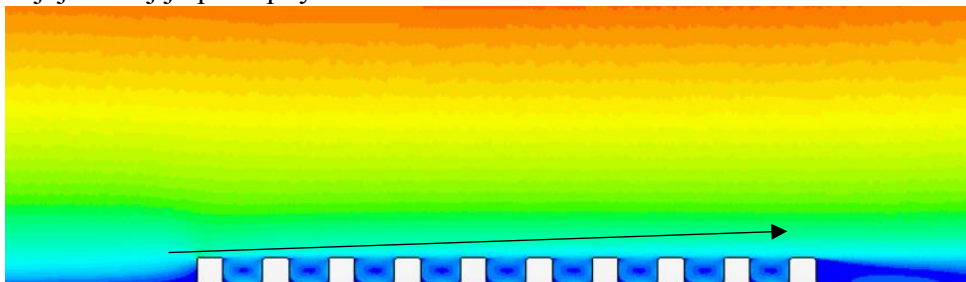


Obr. 3.21 Ukážka prvých troch domov a rýchlostných polí okolo nich, pri prvých domoch sú viditeľne iné rýchlostné polia, preto sú tieto domy vyradené z vyhodnocovania, z dôvodu prechodných javov vznikajúcich v ich okolí [autor]

Tab. 3.4 Vyhodnotenie rýchlostí vzduchu v horizontálnom smere nad domami s horizontálnou strechou [autor]

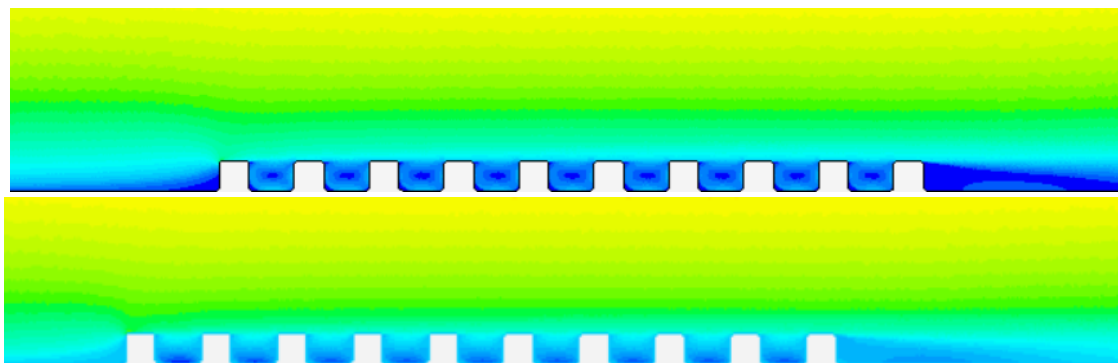
Hor. strecha	Pôvodné prúdenie [m/s]	3. dom [m/s]	4. dom [m/s]	5. dom [m/s]	6. dom [m/s]	7. dom [m/s]	8. dom [m/s]	9. dom [m/s]	10. dom [m/s]	Priemerný pokles rýchlostí
Výška 9 m	4,69	3,77	3,61	3,56	3,57	3,58	3,62	3,64	3,82	20%
Výška 10 m	5	4,46	4,31	4,19	4,15	4,15	4,19	4,21	4,35	14%
Výška 11 m	5,238	5,09	4,91	4,78	4,71	4,62	4,62	4,62	4,72	10%
Výška 12 m	5,46	5,49	5,45	5,37	5,32	5,08	5,02	5,03	5,11	8%

Z tabuľky 3.4 je vidieť, že hodnoty rýchlostí voči pôvodným sa menia pri obtekaní nad domami len do istej miery. Nad domami vzniká už spomínaná vonkajšia medzná vrstva. Je tiež vidieť, že vo výške 12 m medzná vrstva ovplyvnila rýchlosti až od 7. domu, čo potvrdzuje, že jej rozvoj je postupný.



Obr. 3.22 Veľmi málo rozpoznateľný postupný vznik vonkajšej medznej vrstvy [autor] (medznú vrstvu sa dá z obrázka len veľmi ťažko rozpoznať, preto je jej rozvoj vyznačený šípkou)

Z tabuľky 3.4 je tiež vidieť, že hodnoty rýchlostí, pokiaľ je už prúdenie ovplyvnené vonkajšou medznou vrstvou sa príliš nelíšia s pribúdajúcimi domami a ostávajú zhruba na konštantnej hodnote. To je veľmi podstatné zistenie, teda to, že rýchlosť sa už v mestskom prostredí ďalej nezmenšuje, pokiaľ ostávajú prekážky rovnakého tvaru. Samozrejme, je viditeľná miera ovplyvnenia súvisiaca s výškou nad domami, najviac ovplyvnené voči pôvodnému je prúdenie v nižších výškach a ovplyvnenie sa znižuje s rastúcou výškou nad prekážkami, aj keď sa jedná o prúdenie už vnútri vonkajšej medznej vrstvy.



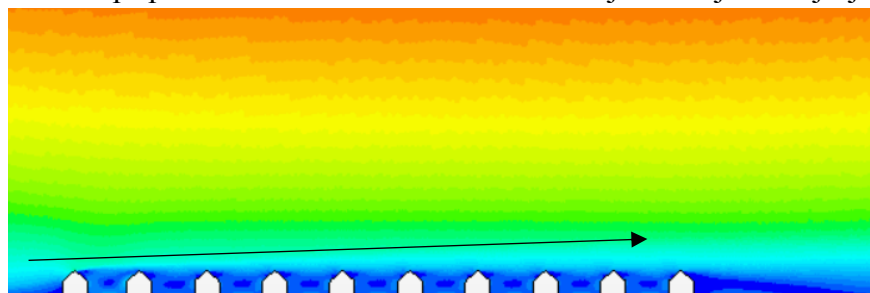
Obr. 3.23 Rozdiel medzi veľkosťou celkovej rýchlosti (hore) a zložky rýchlosti v hor. smere (dole) [autor]

Ako ukazuje obr. 3.23 v prípade domov s horizontálnou strechou sa veľmi nemení rýchlosť celková a jej zložka v horizontálnom smere. Viditeľne sa mení len v oblasti medzi domami, kde je prúdenie turbolentné, tiež sa mení v oblasti náveternej strany prvého domu, kde je takisto prúdenie zložitejšie a dochádza k prechodovým javom. Domy s hor. strechou sa tak javia ako vhodné pre umiestnenie veterného stroja.

Tab. 3.5 Vyhodnotenie rýchlostí vzduchu v horizontálnom smere nad domami so strechou v tvare A [autor]

A strecha	Pôvodné prúdenie [m/s]	3. dom [m/s]	4. dom [m/s]	5. dom [m/s]	6. dom [m/s]	7. dom [m/s]	8. dom [m/s]	9. dom [m/s]	10. dom [m/s]	Priemerný pokles rýchlostí
Výška 9 m	4,69	3,01	2,76	2,74	2,72	2,71	2,75	2,81	2,91	40%
Výška 10 m	5	3,88	3,48	3,37	3,28	3,27	3,27	3,28	3,37	30%
Výška 11m	5,238	4,95	4,39	3,97	3,90	3,81	3,8	3,78	3,86	25%
Výška 12 m	5,46	5,41	5,32	4,82	4,50	4,32	4,31	4,26	4,31	17%

Znova, ako aj v predošlom prípade domov je viditeľný nárast vonkajšej medznej vrstvy v 12 m až od 5. domu. V prípade domov so strechou v tvare A je rozvoj vonkajšej medznej vrstvy výraznejší.

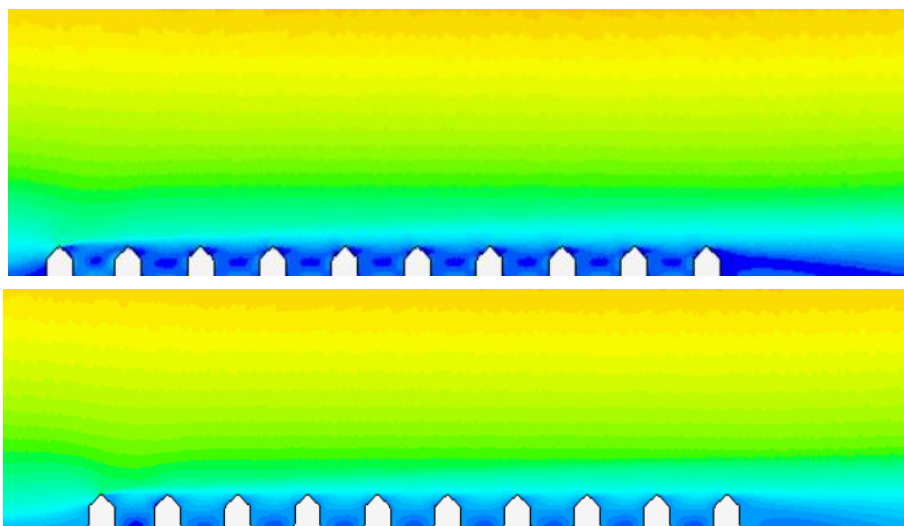


Obr. 3.24 Vznik vonkajšej medznej vrstvy pri domoch so strechou v tvare A [autor]

Podobne ako aj v predošlom prípade je viditeľné, že rýchlosti, pokiaľ sú už vnútri vonkajšej medznej vrstvy sa príliš nemenia s pribúdajúcimi domami. Čo je ale rozdiel od predošlého prípadu, je to, že pokles rýchlosti v horizontálnom smere je omnoho výraznejší a až dvojnásobný. Je to spôsobené tým, že rýchlosť nad hrebeňom strechy má výraznú aj vertikálnu zložku, tým že vzduch prúdi pozdĺž sklonenej strechy, ktorá mu udáva jeho smer. V predošlom prípade vzduch prúdil ponad domy a teda nemalo čo ovplyvniť vertikálnu zložku rýchlostí, teraz ale vzduch prúdi aj pod hranicou vrcholkov striech a prúdi pozdĺž sklonenej strechy, teda má aj výraznú vertikálnu zložku.

Tiež je viditeľná znižujúca sa miera ovplyvnenia prúdenia nad domami s rastúcou výškou, nie je však taká ako v predošlom prípade a ovplyvnenie je značné aj 4 m nad vrcholkami striech.

Z tohto vyplýva aj rozdiel medzi celkovou rýchlosťou a jej zložkou v horizontálnom smere. V tomto prípade je viditeľný rozdiel aj nad strechami, nie len medzi domami.



Obr. 3.25 Rozdiel medzi veľkosťou celkovej rýchlosti (hore) a zložky rýchlosti v hor. smere (dole) [autor]

Z celkového pohľadu by sa dalo povedať, že hranaté budovy sú z hľadiska umiestnenia veterného zariadenia vhodnejšie ako tie, ktoré majú sklonenú strechu z dôvodu väčšieho zachovávanie horizontálnej zložky rýchlosti prúdenia, ktorá je z pohľadu funkcie turbíny tak dôležitá.

3.5.8 Ideálne umiestnenie na streche

V tomto bode by bolo najlepšie urobiť 3D simuláciu, skúsiť na dom fúkať z rôznych smerov a potom vyhodnotiť najlepšie miesto vzhľadom na výšku, v ktorom by bola rýchlosť prúdenia najmenej ovplyvnená vzhľadom na všetky možné smery vetra. Bohužiaľ je k dispozícii len 2D simulácia, preto je vyhodnotená ideálna poloha aspoň vzhľadom na jeden smer vetra. Je nutné mať na pamäti, že turbína inštalovaná na streche nemôže byť umiestnená z hľadiska bezpečnosti veľmi vysoko nad strechu, ideálne by bolo umiestnenie osi turbíny v rozmedzí od 1-3 metre nad strechu.

Pre strechu tvaru A dáva zmysel, vzhľadom na zmienené dôvody jedine umiestnenie na hrebeni strechy. Umiestnenie na náveternej strane by nedávalo zmysel z dôvodu výraznej

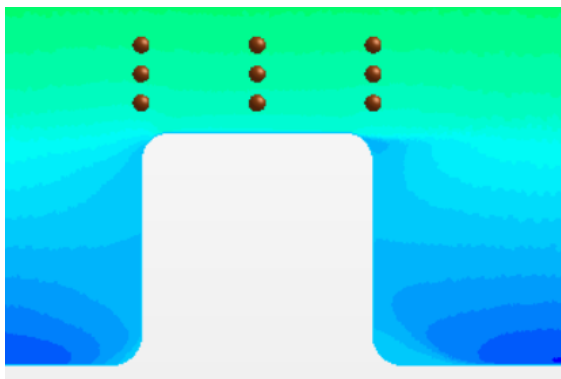
vertikálnej zložky rýchlosti prúdenia. Iba ak by turbína bola voči tomuto prúdu naklonená, to by však moc nenahrávalo variabilite vzhľadom na iné smery vetra, kedy by sa turbína dostala do oblasti víru alebo iných turbolencií. Umiestnenie na záveternej strane by nedávalo zmysel vôbec z dôvodu veľmi výrazného poklesu rýchlostí a výskytu turbolencií.

Pre strechu horizontálneho charakteru vyzerá prúdenia na krajoch a v strede strechy pre rôzne výšky nasledovne.

Tab. 3.6 rýchlostné pole na krajoch a v strede horizontálnej strechy

	Náveterná strana [m/s]	Stred [m/s]	Záveterná strana [m/s]
Výška 9 m	3,44	3,64	3,52
Výška 10 m	4,05	4,21	4,14
Výška 11 m	4,5	4,62	4,55

Z tabuľky 3.6 je vidieť, že rýchlosti na krajoch strechy a v strede strechy sa takmer vôbec nelíšia. Pre tento tvar strechy je teda zhruba jedno, kde turbína bude umiestnená. Záležalo by tak na 3D simulácii, kde by vyšlo ideálne miesto aj vzhľadom na tretí rozmer budovy, ktorý v 2D simulácii nie je viditeľný. Pravdepodobne by však pre túto strechu vyšlo najlepšie miesto v strede strechy, nakoľko sa pozdĺž strechy rýchlosť výrazne nemení. Záleží však na prevládajúcom smere vetra pre danú lokalitu, ktorá tiež ovplyvní ideálne umiestnenie turbíny na streche (potom netreba uvažovať zmeny smery vetru a umiestniť turbínu na kraj domu). Tiež však záleží na uchytení rámu veternej turbíny na streche domu, turbínu nemožno umiestňovať ľubovoľne na streche ale treba dbať na bezpečnosť jej uchytenia, teda na umiestnenie oporných trémov a nosných stien, kde je bezpečné rám veternej turbíny uchytiť do domu.

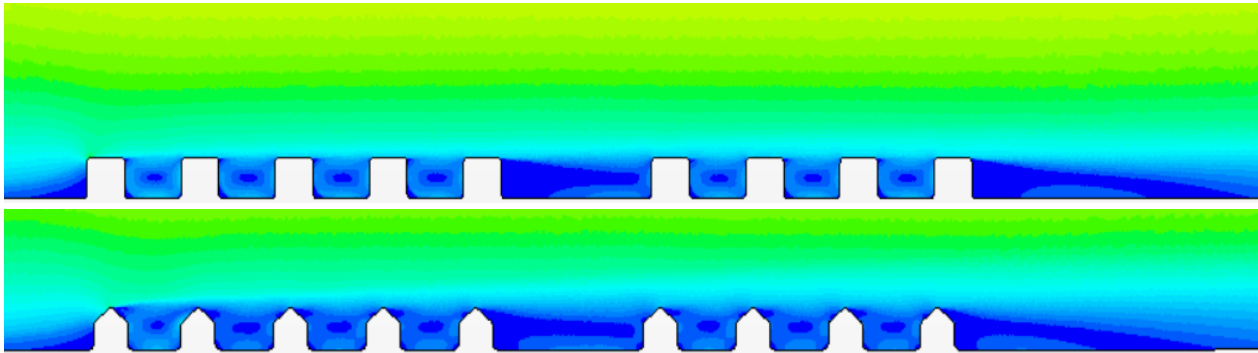


Obr. 3.26 Miesta určenia rýchlostí v horizontálnom smere pre tabuľku 3.6 [autor]

3.5.9 Poruchy idealizovaného radu budov

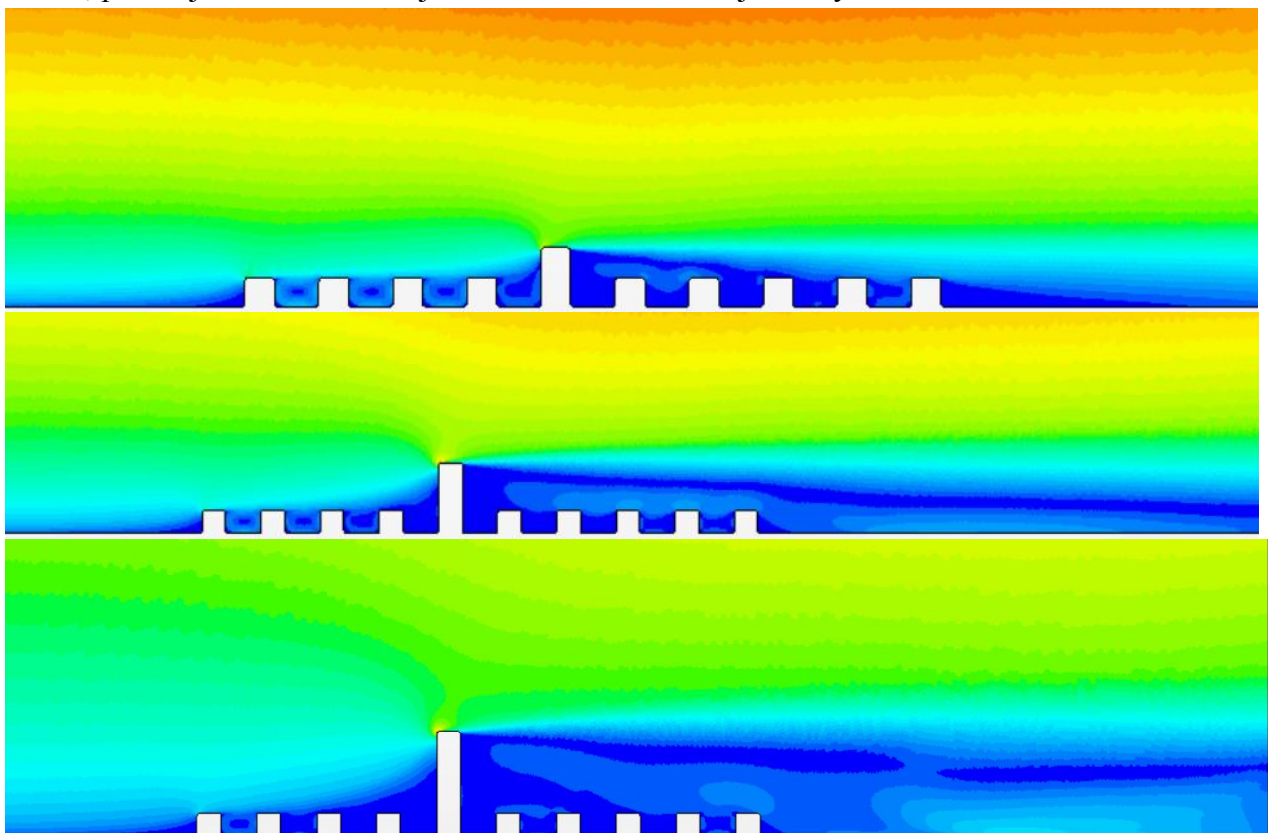
V bežnom meste sa veľmi často môže stať, že v rade pravidelných budov sa vyskytuje istá chyba. V simulácii boli uvažované dva typy chýb a to vynechanie jedného domu a jedna výrazne vyššia budova.

V prípade vynechania domu sa prúdenie príliš nezmenilo, v prípade domov s horizontálnou strechou je prúdenie takmer nezmenené. V prípade domov so strechou v tvare A sa prúdenie trochu pozmenilo, ale nie až tak aby sa dalo uvažovať o nejakom výraznom zlepšení pre dom, ktorý je hneď nasledujúci. Prúdenie tak do veľkej časti zostáva rovnaké, to istá platí aj pre rozvoj vonkajšej medznej vrstvy.



Obr. 3.27 Vplyv vynechania jedného domu na prúdenie ponad domy a na tvorbu vonkajšej medznej vrstvy [autor]

Čo sa ale stane, ak sa prúdeniu vystaví do cesty vyššia budova? To je už o niečom inom, v zásade by sa dalo povedať, že sa stane to isté ako to čo sa stalo pri obtekaní osamotenej prekážky popisovanej v kapitole 3.5.6. V tomto prípade ale jednu vyššiu prekážku obteká prúd, ktorý má vyššiu rýchlosť, v tomto sa prípad jednej vyššej budovy líši od obtekania jedného domu pri zemi. Preto aj rozsah víru a rozsah ovplyvnenia bude väčší. Je však ťažké vyvodzovať konkrétne závery, pretože 2D obtekanie budov v simulácii sa dá prirovnáť k realite jedine ak je budova viac široká ako vysoká. Je však jasné, že rozsah víru a ovplyvnenia bude minimálne taký, aký je spomínaný v kapitole 2.5.6, teda v rozsahu až stoviek metrov. Z toho sa dá formulovať všeobecné odporúčanie, že pokiaľ je pred uvažovaným miestom inštalácie vyššia budova v smere prichádzajúcich prevládajúcich vetrov, potom je táto lokalita zrejme na inštaláciu veternej turbíny nevhodná.

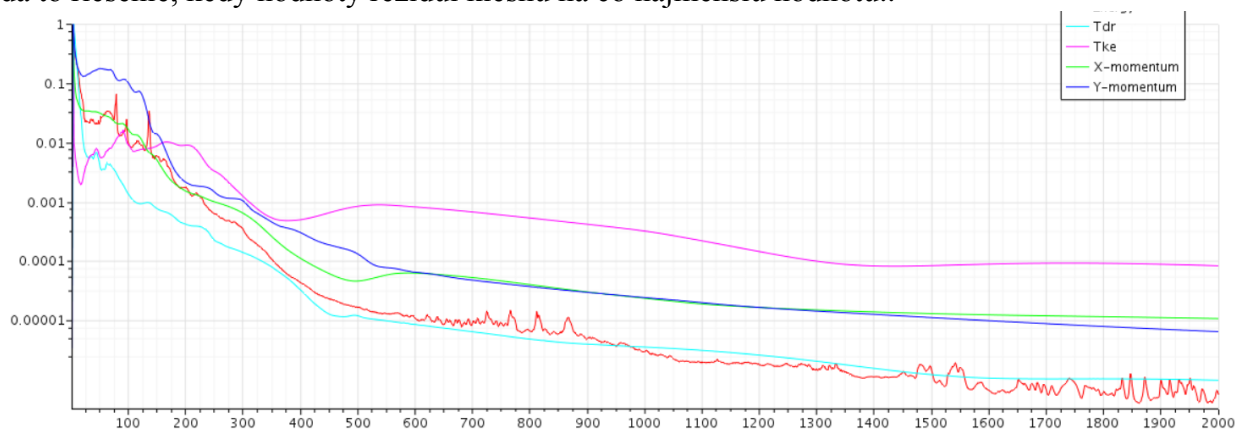


Obr. 3.28 Vplyv vyššej budovy na prúdenie v rade domov, postupne 2x, 3x, 4x-krát vyššej ako okolité domy [autor]

3.5.10 Správnosť riešenia

Správnosť riešenia simulácie udávajú rôzne faktory. Tým najhlavnejším je konvergencia riešenia. Druhým dôležitým faktorom je vystihnutie medznej vrstvy prúdenia, ktorý je daný veličinou Wall Y+.

Konvergencia riešenia udáva rozdiel hodnôt takzvaných reziduí medzi jednotlivými iteráciami riešenia. Medzi reziduá patria hodnoty hybnosti, turbolencie, energií, hmotnostného prietoku v jednotlivých bodoch výpočtovej siete. Graf reziduí potom udáva pomernú zmenu týchto hodnôt medzi jednotlivými iteráciami v bodoch výpočtovej siete. Za dobré riešenie sa pokladá to riešenie, kedy hodnoty reziduí klesnú na čo najmenšiu hodnotu..



Obr. 3.29 Typická konvergencia riešenia simulácií sledovaná pomocou reziduí [autor]

Hodnoty veličiny Wall Y+ ukazujú, ako dobre je výpočtovou sieťou medznej vrstvy vystihnutá už reálna medzná vrstva vypočítaná riešičom. Pri zvolenom modeli popisu medznej vrstvy udáva manuál softwaru STAR CCM+ správnu hodnotu veličiny Wall Y+ pre výpočet od 10 do 90. V simuláciách sa potom optimalizovala výška výpočtovej siete medznej vrstvy tak, aby bola hodnota Wall Y+ pri každej simulácii zhruba na hodnotách od 20 po 55, čo je v danom intervale správnosti, takže riešenie sa dá pokladať za správne.

3.6 Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 3

- Pri prúdení vzduchu v blízkosti povrchu sa vplyvom síl od prekážok (drsnosti povrchu) na povrchu a horizontálnych šmykových napätí pôsobiacich medzi vrstvami vzduchu s rôznou rýchlosťou vytvorí exponenciálny profil prúdenia vzduchu. Je nutné poznamenať, že tento profil nezačína vždy presne od povrchu, ale v prípade vyšších prekážok, napríklad stromov sa začína tento profil tvoriť až od istej výšky v korunách stromov (pričom táto výška je menšia ako celková výška stromov).
- Vplyvom zmeny drsnosti povrchu sa pri tejto zmene vytvorí medzná vrstva, ktorá oddeľuje pôvodný rýchlostný profil od novo vznikajúceho. Výška tejto medznej vrstvy narastá s rastúcou vzdialenosťou od zmeny drsnosti, výška medznej vrstvy sa nazýva prechodová výška. Po istej vzdialenosti rozdiel medzi pôvodným a novým profilom v istej výške vymizne a vznikne tak nový profil rešpektujúci aerodynamický charakter nového povrchu.
- Vyššie osamotené prekážky vedú prúdenie vzduchu značne narušiť a to dvojakým spôsobom. Hneď za prekážkou sa vytvorí vír, kde je rýchlosť prúdenia výrazne

znižená. Oblasť ovplyvnenia však pokračuje aj ďalej za oblasťou víru. Dĺžka ovplyvnenia, kým sa prúdenie dostane do svojej pôvodnej podoby môže dosahovať desaťnásobky výšky prekážky, záleží však na konkrétnej výške budovy ako aj na jej tvare a predovšetkým záleží na rýchlosti vzduchu.

- Vhodné topografické prvky v krajine vedú prúdenia vzduchu ovplyvniť pozitívnym a pre veterný stroj vhodným spôsobom. Jedná sa predovšetkým o kopce a vyvýšeniny.
- Popis prúdenia v mestskom prostredí je iný ako popis prúdenia vo voľnej krajine. Nad mestom sa opäť vytvára vonkajšia medzná vrstva, v ktorej sa vytvára nový rýchlostný profil rešpektujúci aerodynamické charakteristiky mesta. V istej vzdialenosti a výške od začiatku mesta sa novo vzniknutý profil plynule napojí na pôvodný rýchlostný profil, zanikne tak rozdiel medzi nimi daný náhlou zmenou prekážok na povrchu. V istej výške nad budovami sa dá prúdenie popísať pomocou známeho logaritmického vzťahu, ktorý rešpektuje tvar budov a ich rozmiestnenie. Tento vzťah popisuje množstvo vedeckých prác. Tesne nad domami je však vrstva, kde sa trojrozmerné prúdenie mení na dvojrozmerné dané logaritmickým vzťahom. Táto vrstva je však ťažko opísateľná a práve v nej by sa mala nachádzať turbína.
- Pre vyhodnotenie tejto vrstvy bola pre vybrané geometrie budov vytvorená numerická simulácia prúdenia. V nej bolo overené, že pre osamotené prekážky môže vír a oblasť ovplyvnenia za prekážkou dosahovať do vzdialenosti niekoľkonásobkov výšky prekážky. Overilo sa tiež, že táto oblasť závisí na geometrii budovy, výške budovy a hlavne na rýchlosti prúdenia okolo nej.
- Ďalej bola vytvorená simulácia pre rad budov. Overilo sa postupne vytváranie vonkajšej medznej vrstvy oddeľujúcu pôvodné prúdenie od novo vznikajúceho. Zistilo sa, že pokiaľ sa už prúdenie nachádza vnútri tejto vrstvy a typ prekážok sa nemení, potom sa s pribúdajúcimi prekážkami nemení ani rýchlosť prúdenia v rovnakej výške. Z toho vyplýva, že je zhruba jedno, či je turbína postavená na piatom dome od kraja mesta, alebo je turbína postavená hlbšie v meste ak sa výška prekážok príliš nemení (toto tvrdenie potvrdzujú aj namerané hodnoty rýchlostí vzduchu uvedené v kapitole 5). Záleží však na geometrii domov, najvhodnejšie pre umiestnenie turbíny sú budovy s horizontálnou strechou, kde pokles rýchlostí v závislosti na výške môže dosahovať hodnoty od 20% až 8%. Budovy so strechou v tvare A majú tento pokles v závislosti na výške výraznejší a to od 40% po 17%.
- Ideálne umiestnenie vzhľadom na variabilitu smeru vetra je pre domy so strechou v tvare A na hrebeni strechy. Pre domy s horizontálnou strechou je to zhruba jedno, kde sa turbína umiestni, pretože vzhľadom na kraje a stred strechy sa rýchlosť vzduchu príliš nemení.
- Veľkú zmenu prúdenia k horšiemu môže spôsobiť jedna vysoká budova, za ňou môže dosahovať oblasť ovplyvnenia rýchlostí až stovky metrov. Pri umiestnení turbíny si tak je nutné dávať pozor na prevládajúci smer vetru.
- Na koniec je nutné formulovať všeobecný a logický záver pre vhodnosť umiestnenia veterných turbín v mestách. Neexistuje žiadne zázračné miesto v nízkych výškach v mestách, kde by aj vzhľadom na variabilitu smeru vetra bolo veľmi výhodné turbínu umiestniť. Čím vyššie je turbína umiestnená, tým väčší energetický výťažok bude dosahovať.

4 Veterné stroje

Nasledujúca kapitola bude venovaná veterným strojom vo všeobecnosti, o ich rozdelení, princípoch ich funkcie a ich obmedzeniach. Budú tu predstavené už zaužívané a overené zariadenia ako aj zariadenia, ktoré sú využívané menej často, tiež tu budú spomenuté zariadenia, ktoré sú len vo fáze vývoja a testovania. Na radu sa dostane aj vlastná konštrukcia zariadení ako aj príslušenstvo, ktoré k nim patrí.

4.1 Rozdelenie veterných strojov

Veterné stroje sa dajú rozdeliť podľa rôznych kritérií. Azda najdôležitejším kritériom je princíp ich funkcie, teda aerodynamický princíp, ktorý má na ich fungovanie najväčší význam. [6] Okrem princípu ich funkcie sa dajú rozdeliť podľa:

Podľa smeru osi otáčania- so zvislou osou otáčania (Savoniov rotor, Darreiov rotor...)

- s horizontálnou osou otáčania (veterný mlyn, vrtuľová veterná turbína...)

Podľa typu poháňaného stroja- stroje na výrobu elektriny

- stroje na čerpanie vody
- stroje fungujúce ako generátory tepla
- stroje pre iné účely (pohon kompresoru na stlačený vzduch...)

Podľa rýchlosti otáčania- stroje pomalobežné (rýchlosť na konci lopatiek je menšia nanajvýš rovná rýchlosti vzduchu)

- stroje rýchlobežné (rýchlosť na konci lopatiek je väčšia prinajmenšom rovná rýchlosti vzduchu)

Rozdelenie podľa aerodynamického princípu- pri obtekaní všeobecného telesa pôsobí na teleso sila, ktorá vyplýva z princípu akcie a reakcie. Táto sila sa dá rozložiť do dvoch smerov a to v smere vetra (odpor) a v smere kolmom na vietor (vztlak). Podľa toho, ktorú zložku veterný stroj prevažne využíva na svoj pohyb sa tieto stroje rozdeľujú. Je však nutné podotknúť, že na funkčné plochy stroja vždy pôsobia obe tieto zložky výslednej aerodynamickej sily.

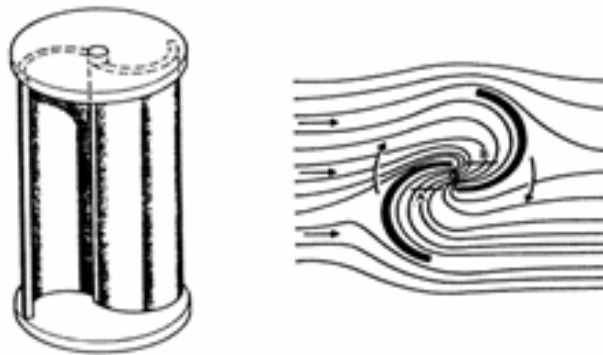
4.1.1 Stroje pracujúce na odporovom princípe

Daný typ veterných strojov sa používa už od dávnych čias. Môžu mať zvislú aj horizontálnu osu otáčania. Jednotlivé typy sa od seba môžu líšiť, čo sa konštrukcie týka, ich princíp je však vždy rovnaký.

Ich podstatou je plocha vystavená prúdu vzduchu, ktorá mu kladie aerodynamický odpor, plocha prúd vzduchu spomaľuje a je na ňu vyvolávaná sila, ktorá je mechanicky prevádzaná na rotačný pohyb. Prúd vzduchu teda plochu neobteká ale do nej "vráza" a tlačí plochu pred sebou. To je rozdiel medzi odporovými a vztlakovými strojmi. Plocha nastavená vzduchu sa pohybuje v jeho smere zhruba menšou rýchlosťou ako je rýchlosť vzduchu, preto

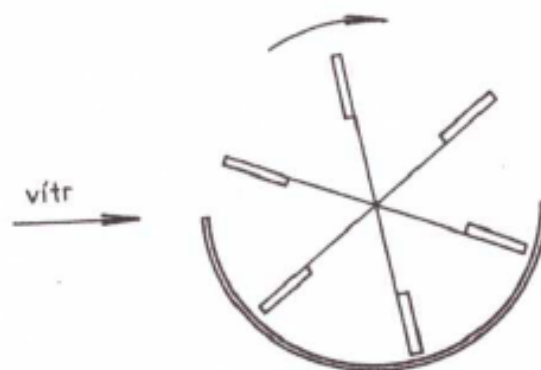
sa tieto typy strojov označujú tiež ako pomalobežné. [6] Pri rotačnom pohybe plochy ale vzniká problém, ako dostať plochu na pôvodné miesto bez toho aby pri spätnom pohybe kládla plocha vzduchu rovnaký odpor ako opačná plocha pri pohybe so smerom vzduchu, pretože potom by boli sily pôsobiace na plochy vzhľadom na os otáčania rovnaké a stroj by sa netočil. Tento problém sa dá vyriešiť niekoľkými spôsobmi:

a) Funkčná plocha má taký tvar, aby bol jej odpor pri rôznych smeroch natočenia voči prúdiacemu vzduchu rôzny. Tento efekt sa dá jednoducho dosiahnuť prehnutím funkčnej plochy, vytvorí sa tak vydutý resp. vypuklý tvar. Predstaviteľom daného typu stroja je rotor typu Savonius, ktorý sa skladá z dvoch zakrivených valcových plôch s kruhovou základňou, ktoré sú navzájom pretsadené. Jeho zakrivené plochy kladú vzduchu rôzny odpor, plocha orientovaná dutinou proti vetru vytvára približne 3,5 krát väčší odpor ako plocha vystavená vetru svojou vypuklou časťou. [6] Sila závisí priamo úmerne vznikajúcemu odporu a týmto spôsobom sa vzhľadom na os otáčania vytvára točivý moment.



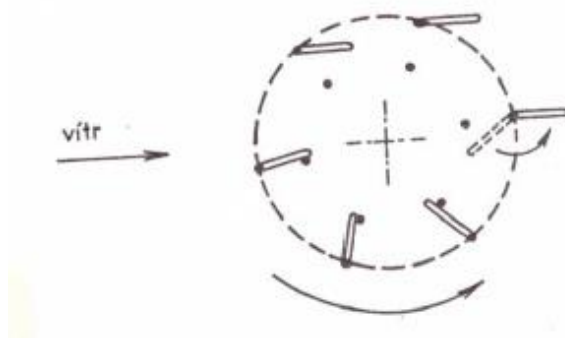
Obr. 4.1 Savoniov rotor spolu s ukázkou prúdenia okolo a medzi lopatkami [30]

b) Časť rotoru, ktorá sa pohybuje proti smeru vetru je zakrytá štítom, ktorý sa musí natáčať s meniacim sa smerom vetru. V tomto prípade môžu byť plochy rovinné, bez špeciálneho tvarovania. [6] Na zakryté funkčné plochy nepôsobí vietor vôbec a teda sila pôsobí len na vetru vystavených plochách, čo spôsobuje krútiaci moment.



Obr. 4.2 Prevedenie odporového veterného stroja s krytom [6]

c) Mení sa veľkosť plochy vetru vystavenej podľa toho, či sa plocha pohybuje so smerom vetru alebo proti smeru vetru, týmto spôsobom sa vytvára rozdiel v silách pôsobiacich na plochy a teda krútiaci moment. Tento spôsob zmenšenia odporu však vyžaduje samostatný mechanizmus, ktorý umožňuje natáčanie lopatiek. [6]



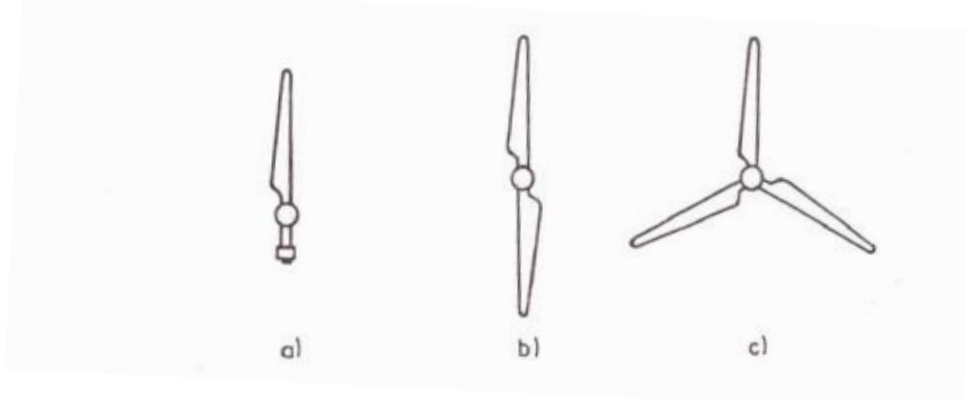
Obr. 4.3 Prevedenie odporového veterného stroja s otočnými funkčnými plochami [6]

4.1.2 Stroje pracujúce na vztlakovom princípe

Medzi stroje pracujúce na vztlakovom princípe patria vrtule a veterné kolesá, ktoré majú horizontálnu osu otáčania. Patria sem ale aj rotory typu Darrieus s vertikálnou osou otáčania.

Princípom ich funkcie je na rozdiel od odporových strojov rozdiel tlakov (vztlak) vznikajúci na protiľahlých stranách špeciálne tvarovaného profilu pri obtekaní vzduchu. Vztlak vytvára na plochách listu vrtule silu, ktorá je mechanicky prevedená na rotačný pohyb, keďže je list s profilom pri zjednodušení kolmý na os otáčania a na neho sila pôsobí. Viac o vzniku vztlaku, jeho zákonitostiach a o stanovovaní rôznych aerodynamických koeficientov bude napísané nižšie v tejto kapitole.

a) Vrtule sa najčastejšie vyskytujú v trojlístom prevedení, aj keď sú známe prípady aj dvojlistých prevedení, prípadne existujú aj prevedenia a jedným listom. Listy vrtule sú v reze tvorené špeciálnym profilom, ktorý vytvára vztlak ak ho obteká prúd vzduchu, hovorí sa mu letecký profil. Všeobecne platí, čím menej listov, tým väčšie sú otáčky rotoru. V niektorých prípadoch je možné listy vrtule okolo svojej osi natáčať za účelom regulácie otáčok, výkonu alebo využiť zmenu natočenia ako aerodynamickú brzdu. [6] Ich funkcia ale závisí na smere vetra do ktorého sa musia natáčať tak, aby rovina vrtule bola kolmá na smer vetru.



Obr. 4.4 Schéma usporiadania listov vrtuľového veterného stroja [6]

b) Větrné kolesá sa líšia od vrtúľ prevedením listov, ktoré sú spravidla len jednoduché plechové lopatky. Líšia sa tiež počtom listov, ktorý je v tomto prípade od štyroch listov až po niekoľko desiatok. Z toho vyplýva aj to, že sa tieto rotory budú otáčať pomalšie. Z počtu listov sa dá ale určiť ešte jedna vec a tou je ľahkosť rozbehu. Pri väčšom počte lopatiek sa rotor lepšie rozbieha pretože má pri rozbehu väčší moment sily vyplývajúci z počtu a tvaru listov. [6] Tiež listy sú navrhnuté na nižšiu obvodovú rýchlosť, čiže pri rozbehu nie je veľký rozdiel medzi počiatočným a koncovým stavom rotácie a na lopatky pôsobí už značný vztlak aj pri rozbehu. Vrtule sa rozbiehajú ťažšie, pretože majú malý počet listov a ich listy sú navrhnuté až na istú (vysokú) obvodovú rýchlosť resp. otáčky, kedy na nich pôsobí najväčší vztlak teda sila (pri nižšej obvodovej rýchlosti a jednotnej rýchlosti vetra pri rozbehu vztlak nebude až taký výrazný). Ich funkcia tiež ako pri vrtuliach záleží na smere vetra do ktorej sa musia natáčať pomocou smerového vodítka. [6]



Obr. 4.5 Větrné koleso [31]

c) Darrieusove rotory pracujú tiež na princípe vztlaku, je však otáznou, či sa v priebehu otáčania profilu vzhľadom na os otáčania nedostane do popredia tvorby krútiaceho momentu aj odporová zložka. Zdroje [2] a [6] však uvádzajú tento stroj ako vztlakový, aj keď v istom momente rotácie vytvára krútiaci moment prevažne odporová zložka sily (vzhľadom na jeden list), po väčšine rotácie ho však dominantne vytvára vztlaková zložka.

Ich listy sú v reze vyhotovené ako u vrtúľ z leteckého profilu. Jednotlivé prevedenia sa môžu líšiť počtom listov, alebo ich natáčaním za účelom regulácie. Môžu sa tiež líšiť tvarom listov a to v tvare písmena O, alebo H, prípadne s listami v trojuholníkovom tvare. Prevedenia s rovnými (prizmatickými) listami majú výhodu v možnosti natáčania listov. Veľkou nevýhodou je však ich štart, ako už bolo povedané, pokiaľ má zariadenie málo listov s leteckými profilmi, tak pracuje za vyšších otáčok, teda aby dosiahli potrebný vztlak na list, potrebujú istú obvodovú rýchlosť. Pri štarte ale potrebný vztlak na list nepôsobí a tak rotory tohto typu potrebujú na rozbeh cudzí zdroj. Výhodou však môže byť, že ich funkcia nezáleží na smere vetra. [6]



Obr. 4.6 Rôzne typy Darreiových rotorov [32]

Okrem vyššie uvedených veterných strojov však existujú aj iné typy pracujúce buď na odporovom alebo vztakovom princípe. Spravidla však nie sú veľmi rozšírené a ich použitie nie je praktické. Môžeme sem zaradiť zariadenia využívajúce Magnusov efekt, prípadne zariadenia využívajúce ako listy rotoru plachty...

4.2 Obmedzenia a princípy veterných strojov

4.2.1 Princíp odporových veterných strojov

Princípom fungovania veterných strojov je vhodné vyvodenie a využitie aerodynamických síl pôsobiacich na list rotoru, ktorý vykonáva relatívny pohyb voči pohybujúcemu sa vzduchu. Ako bude zmienené v kapitole o aerodynamike, výsledná sila pôsobiaca od vzduchu na list alebo lepšie povedané funkčnú plochu rotoru sa dá rozložiť na dve základné zložky, prvou z nich je odpor a druhou vztlak. Je len na type veterného stroja, ktorú z týchto zložiek síl vie využiť viac. Pri odporových strojoch je to odporová zložka (zložka výslednej aerodynamickej sily pôsobiaca v smere pohybu vzduchu).

Pre jednoduchosť výkladu princípu fungovania odporových strojov sa bude odvodenie zjednodušovať na rovnomerný priamočiary pohyb rovinatej dosky o ploche S [m²], ktorá je kolmá na smer vetru, má absolútnu rýchlosť v_d [m/s], rýchlosť vetru je v [m/s], koeficient odporu dosky je c_x [-] (bude vysvetlený v kapitole o aerodynamike, záleží predovšetkým na tvare plochy), hustota vzduchu ρ [kg/m³], potom je relatívna rýchlosť dosky voči vzdušnému prúdu $w=(v - v_d)$ [m/s] a sila pôsobiaca na túto dosku je [2]

$$F_x = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot c_x (v - v_d)^2 \quad [\text{N}] \quad (4.1)$$

Výkon, ktorý tejto doske môžeme odobrať alebo ho využiť je

$$P_d = F_x \cdot v_d = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot c_x (v - v_d)^2 \cdot v_d \quad [\text{W}] \quad (4.2)$$

Výkon, ktorý si so sebou teoreticky nesie nerušený vzduchový prúd je

$$P_w = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v^3 \quad [\text{W}] \quad (4.3)$$

Výkon stratový teda bude rozdielom daných výkonov a po úprave vyzerá

$$P_z = P_w - P_d = P_w \cdot \left[1 - c_x \cdot \frac{v_d}{v} \cdot \left(\frac{v - v_d}{v} \right)^2 \right] \quad [\text{W}] \quad (4.4)$$

Zavedením pomeru rýchlostí

$$\epsilon = \frac{v_d}{v} \quad [-] \quad (4.5)$$

A vhodnom dosadení pomeru rýchlostí do vzťahov 4.2 a 4.4 dostaneme pri určení účinnosti nasledujúci vzťah

$$\eta = \frac{P_d}{P_w} = \frac{P_w - P_z}{P_d} = c_x \cdot (1 - \epsilon)^2 \cdot \epsilon \quad [-] \quad (4.6)$$

Pokiaľ chceme zistiť extrémny funkcie účinnosti, teda jej maximum alebo minimum, urobíme to jednoduchou matematickou funkciou, a to položením derivácie účinnosti podľa pomeru rýchlostí rovnú 0

$$\frac{d\eta}{d\epsilon} = 0 \quad (4.7)$$

Z tejto podmienky vychádzajú dva korene a to

$$\epsilon_1 = 1 \text{ a } \epsilon_2 = \frac{1}{3};$$

Pri $\epsilon_1 = 1$ je $v = v_d$ a teda nedochádza k relatívnemu pohybu vzduchu a dosky, z čoho vyplýva, že sa nevytvára na dosku žiadna sila a výkon získaný je nulový, z čoho je nulová aj účinnosť. V prípade $\epsilon_2 = \frac{1}{3}$, pri uvažovaní $c_x = 1,3$ [-] (hodnota pre rovinnú dosku) je maximálna teoretická účinnosť pri premene energie z pohybujúceho sa vzduchu na pohyb dosky

$$\eta_{max, odporové} = c_x \cdot (1 - \epsilon)^2 \cdot \epsilon = 1,3 \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) = 0,195 \quad [-] \quad (4.8)$$

Ako je vidieť z rovnice 4.8 je táto účinnosť premeny energie veľmi malá a to sa pritom ešte neuvažujú straty trením, mechanickým prevodom a nezohľadňuje sa tiež účinnosť pracovného stroja. Odvodenie tiež uvažuje priamočiary pohyb nie rotáciu, rovinnú dosku nie vyduté alebo inak tvarované plochy (tvarované plochy by zvýšili koeficient odporu c_x). Pri uvažovaní rotácie by odvodenie vyzeralo úplne inak, bolo by značne zložitejšie a najpravdepodobnejším výsledkom by bolo to, že účinnosť premeny energie by bola ešte nižšia, pretože by pri prúde vzduchu okolo rotujúcich plôch mohli vzniknúť iné javy ako je to v prípade jednoduchého prúdenia okolo rovinatej dosky a premenu energie by teda znižovali. Veľkosť účinnosti ako je vidieť závisí na procesoch a princípoch pri ktorých sa premena deje, využívať teda čisto len odpor nie je veľmi výhodné. Na druhú stranu, zariadenia využívajúce odpor sú značne jednoduchšie na výrobu a prevádzku.

4.2.2 Princíp vztlakových veterných strojov

Z hľadiska aerodynamiky a teda aj vztlaku môžeme veterné stroje vyšetřovať podľa rôznych spôsobov, podľa toho, akú časť stroja vyšetřujeme, alebo či vyšetřujeme samotný vzdušný prúd pretekajúci cez rotor. [2] V nasledujúcej kapitole sa pozrieme na princíp fungovania vztlakových veterných strojov z hľadiska premeny energie zo vzdušného prúdu, teda podľa takzvanej prúdovej teórie. Viac z premeny energie zo strany stroja bude v kapitolách venujúcich sa samotnej aerodynamike.

Prúdová teória je najjednoduchšie poňatie vyšetrenia veterného stroja. Pri nej sa predpokladá že veterné koleso (alebo vrtuľa) má nekonečne veľa lopatiek malej hrúbky, teda vzduch, ktorý prechádza plochou rotora musí jednoznačne prísť do kontaktu s lopatkou. Tiež sa predpokladá, že axiálny tlak je po celej ploche rotora rovnaký (predpoklad dôležitý na dosadenie do impulzovej rovnice) a že za rotorom nevznikajú vzdušné rotácie. [2] Samozrejme sa tiež zanedbáva trenie vzduchu a lopatiek rotora.

Pre vysvetlenie princípu funkcie budeme uvažovať stroj s rotorom o priemere D [m], rýchlosť vetra v_0 [m/s] je rýchlosť vetra ďaleko pred vrtuľou (v neovplyvnenej oblasti), v_1 [m/s] je rýchlosť tesne pred strojom, v' [m/s] je rýchlosť v rovine rotora a nakoniec v_3 [m/s] je rýchlosť vetra ďaleko za strojom. Z impulzovej vety, dostaneme axiálnu silu pôsobiacu na plochu vrtule [2]

$$F_a = \dot{m} \cdot (v_0 - v_3) \text{ [N]} \quad (4.9)$$

kde \dot{m} [kg/s] je hmotnostný prietok, ktorý pretečie každú sekundu plochou rotora

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.10)$$

a keď ρ [kg/m³] je hustota vzduchu potom je rovný

$$\dot{m} = S \cdot \rho \cdot v' \text{ [kg/s]} \quad (4.11)$$

Zo sily na rotor, určíme aký výkon vrtuľa spracuje

$$P_{rot} = F_a \cdot v' = S \cdot \rho \cdot v'^2 \cdot (v_0 - v_3) \text{ [W]} \quad (4.12)$$

Tento výkon sa dá tiež vyjadriť ako rozdiel výkonov pred a za strojom, teda z pohybovej energie prúdu

$$P_{rot} = \dot{m} \cdot \frac{(v_0^2 - v_3^2)}{2} = S \cdot \rho \cdot v' \cdot \frac{(v_0^2 - v_3^2)}{2} \text{ [W]} \quad (4.13)$$

Porovnaním 4.12 a 4.13 dostaneme rýchlosť vetru v rovine rotora

$$v' = \frac{(v_0 + v_3)}{2} = v_0 \cdot \frac{1 + \epsilon}{2} \text{ [m/s]} \quad (4.14)$$

pri zavedení pomeru rýchlostí

$$\epsilon = \frac{v_3}{v_0} \text{ [-]} \quad (4.15)$$

Výkon rotorom spracovaný je po dosadení rýchlostného pomeru a zjednodušení

$$P_{rot} = S \cdot \rho \cdot \frac{(v_0 + v_3)}{2} \cdot \frac{(v_0^2 - v_3^2)}{2} = S \cdot \frac{\rho}{4} \cdot v_0^3 \cdot (1 + \epsilon) \cdot (1 - \epsilon^2) \text{ [W]} \quad (4.16)$$

Výkon nerušeného vzdušného prúdu pretekajúceho cez rovnakú plochu S je ako aj podľa 4.3

$$P_w = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_0^3 \text{ [W]} \quad (4.17)$$

Účinnosť (nazývaný tiež teoretický činiteľ výkonu) stroja potom bude pomer získaného výkonu k výkonu nerušeného prúdu prechádzajúceho cez rovnakú plochu

$$\eta = \frac{P_{rot}}{P_w} = \frac{v_0 + v_3}{2} \cdot \frac{v_0^2 - v_3^2}{v_0^3} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \epsilon) \cdot (1 - \epsilon^2) \text{ [-]} \quad (4.18)$$

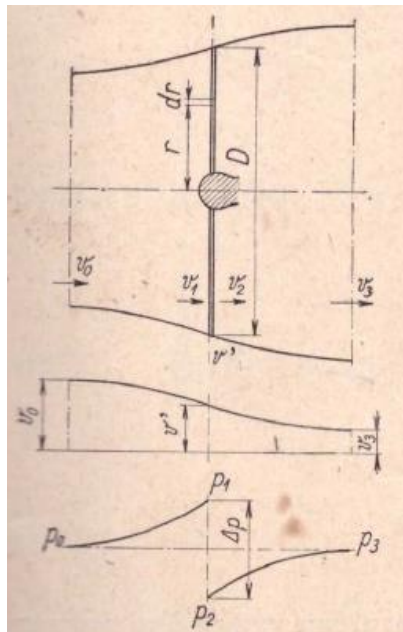
Tak isto ako v kapitole 4.2.1, použijeme rovnicu 4.7, ktorá je zároveň podmienkou keď hľadáme extrém funkcie, v tomto prípade extrém účinnosti vzhľadom na pomere rýchlostí

$$\frac{d\eta}{d\epsilon} = 0$$

a dostaneme maximum, ktoré je pri hodnote $\epsilon = \frac{1}{3}$ a má veľkosť

$$\eta_{max, vztlakové} = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad [-] \quad (4.19)$$

Hodnota 0,5926 je teda teoretické maximum, ktoré sa z princípu fungovania vztlakových strojov dá získať. Nazýva sa tiež Betzov limit alebo výkonový súčiniteľ, potom sa označuje ako c_p . [2] Je to spôsobené tým, že rotor nedokáže spracovať alebo lepšie povedané znížiť kinetickú energiu vetra na nulu, nedávalo by ale zmysel, aby stroj úplne zastavoval prúd vzduchu, pretože potom by už cez rotor žiadny ďalší vzduch neprúdil. Druhým faktorom prečo je účinnosť relatívne nízka je to, že vzduch privádzaný na rotor má ďaleko pred rotorom menší prierez ako v rovine rotoru, teda ho na vrtuľu privádzame menej o rozdiel prietochných plôch v rovine rotoru a pred rotorom (porovnanie hmotnostných tokov s rýchlosťou v_0 o ploche S_0 a S).



Obr. 4.7 Priebeh rýchlostí, tlakov a prúdovej trubice pred a za rotorom veterného stroja potrebných pre odvodenie prúdovej teórie [6]

Keď sa v účinnosti porovnáva výkon stroja s výkonom nerušeného vzdušného prúdu, ktorý prúdi cez plochu rovnú ploche rotoru, vychádza účinnosť potom nižšia. Betzov limit teda pojednáva o rozdiel prietochnej plochy vzduchu na rotor privedenej a prietochnej plochy nerušeného prúdu vzduchu prechádzajúceho rotorom.

Je tiež otázne, či účinnosť spomenutá vo vzťahu 4.18 sa dá nazývať účinnosťou, pretože reálne neporovnáva hodnoty výkonov, ktorý na rotor privádzame a ktorý z rotora odchádza. Porovnáva hodnoty výkonov, ktorý z rotora odchádza a ktorý má nerušený prúd o rovnakej ploche, ale keďže vieme, že sa prietochná plocha vzduchu pred rotorom mení, môže

tu vzniká otázka, či je správne pomenovať túto veličinu účinnosťou rotoru. Odpoveďou je, že žiadna publikácia túto veličinu nenazýva účinnosťou rotoru. Je to však účinnosť, ktorá vyplýva z princípu fungovania veterného stroja pracujúceho na princípe vztlaku, ktorý popisuje prúdová teória a principiálne obmedzuje premenu energie zo vzduchu na energiu mechanickú, nazval by som ju teda principiálna účinnosť.

Pre predstavu si môžeme uviesť aj výkon, ktorý je vrtuli privedený

$$P'' = \frac{1}{2} \cdot S_0 \cdot \rho \cdot v_0^3 \quad [\text{W}] \quad (4.20)$$

Z rovnice kontinuity sa dá určiť prierez S_0

$$S_0 \cdot v_0 \cdot \rho = S \cdot v' \cdot \rho \quad [\text{m}^2] \quad (4.21)$$

$$S_0 = S \cdot \frac{v'}{v_0} = S \cdot \frac{v_0 + v_3}{2 \cdot v_0} = S \cdot \frac{1 + \varepsilon}{2} \quad [\text{m}^2] \quad (4.22)$$

Porovnaním výkonu rotorom spracovaným a výkonom rotoru privedením vznikne účinnosť rotoru

$$\eta_{stroj} = \frac{P_{rot}}{P''} = 1 - \left(\frac{v_3}{v_0}\right)^2 = 1 - \varepsilon^2 \quad [-] \quad (4.23)$$

Táto funkcia má maximum pri $\varepsilon = \frac{1}{3}$ a má hodnotu $\eta_{stroj} = \frac{8}{9}$.

Ako je vidieť, účinnosť samotného rotoru je vyššia, pretože zahŕňa len straty tým, že rotor nespracuje celú kinetickú energiu vzdušného prúdu a teda rýchlosť za rotorom je nejaká. Keďže ale výkon rotoru sa vždy uvádza s plochou samotného rotoru, musí sa pri dosadzovaní účinnosti dosadiť minimálne účinnosti určená z prúdovej teórie, ktorá už obsahuje obe straty, teda straty výstupnou rýchlosťou a spomínané straty v rozdiel prietochných plôch.

4.2.3 Poznatky vyplývajúce z prúdovej teórie

Snáď najdôležitejším poznatkom vyplývajúcim z prúdovej teórie je maximálna hodnota účinnosti veterných zariadení na hodnote 0,593. Od tejto hodnoty môže byť účinnosť zariadenia len menšia, pretože prúdová teória nezahŕňa straty vírom za turbínou, konečným počtom lopatiek = straty indukovaným vírom na konci lopatiek, straty odporom aerodynamického profilu. [25]

Dosadením do rovnice 4.14 hodnotu $\varepsilon = \frac{1}{3}$, kedy má rotor najvyššiu účinnosť získame hodnoty rýchlosti v rovine rotoru, kedy je táto účinnosť najvyššia.

$$v' = \frac{(v_0 + v_3)}{2} = v_0 \cdot \frac{1 + \varepsilon}{2} = \frac{2}{3} \cdot v_0 \quad [\text{m/s}] \quad (4.24)$$

Ďalším dôležitým vzťahom je konečný vzťah pre mechanický výkon rotoru, ktorý sa dá odvodiť z rovnice 4.18 a dosadením $\eta_{max, vztlakové} = \frac{16}{27} = 0,5926$

$$P_{mech} = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_0^3 \cdot \eta_{max, vztlakové} = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_0^3 \cdot \frac{16}{27} \quad [\text{W}] \quad (4.25)$$

Pre výpočet je tiež nutné uviesť vzťah pre mernú optimálnu prácu elementu rotoru a to nasledovne

$$P_{opt} = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_0^3 \cdot \eta_{max, vztlakové} = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_0^3 \cdot \frac{16}{27} = \rho \cdot S \cdot v_0^3 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^3 \quad [\text{W}] \quad (4.26)$$

Optimálny výkon rotoru sa dá vo všeobecnosti napísať aj ako

$$P_{opt} = a_{opt} \cdot \dot{m} \quad [\text{W}] \quad (4.27)$$

Dosadením rovnice 4.24 do rovnice 4.26 dostaneme tvar

$$P_{opt} = \rho \cdot S \cdot v_0^3 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^3 = \rho \cdot S \cdot v_0^2 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 \cdot v' \quad [\text{W}] \quad (4.28)$$

Porovnaním vzťahov 4.28 a 4.27 a následnou úpravou získame vzťah pre optimálnu prácu elementu turbíny

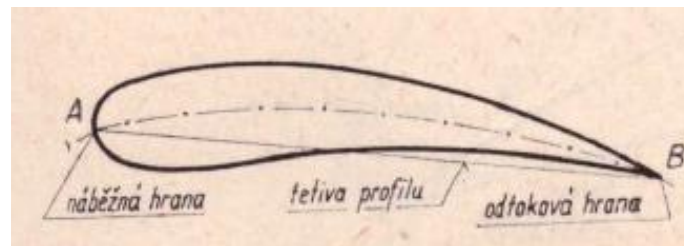
$$a_{opt} = \frac{P_{opt}}{\dot{m}} = \frac{4}{9} v_0^2 \quad [\text{J/kg}] \quad (4.29)$$

Ako vidieť, z prúdovej teórie vyplývajú dôležité vzťahy pre výpočet rotoru turbíny, jedná sa predovšetkým o vzťahy 4.24, 4.25, 4.29.

4.3 Aerodynamika profilov lopatiek

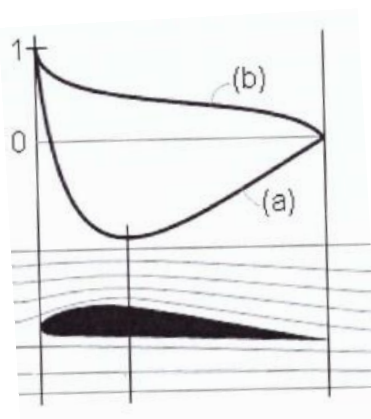
Pod pojmom aerodynamika profilov lopatiek sa myslí vyšetrenie silového pôsobenia na špeciálne tvarovaný letecký profil lopatky veternej turbíny pri obtekaní vzduchu. Výsledkom štúdie aerodynamiky profilov sú vlastnosti profilu, ktoré sú zovšeobecnené a vyjadrujú sa pomocou koeficientov.

Na začiatok je však dobré definovať, ako tento profil vyzerá, teda definovať jeho geometriu a tvar.



Obr. 4.8 Aerodynamický profil leteckého profilu spolu s popisom jeho dôležitých častí [6]

Pri obtekaní profilu zobrazeného na obr. 4.8 sa prejaví jeho nesúmernosť a na profil začne pôsobiť sila vznikajúca z rozdielov tlakov na vrchnej a spodnej strane lopatky. Vznik rozdielnosti tlaku sa dá pre jednoduchosť vysvetliť takto: na vypuklej strane profilu sa prúdenie musí zrýchliť, pretože preteká cez menší prierez (vyplýva to zo zhustenia prúdnic v obr. 4.9) keď sa prúdenie zrýchli, tak musí klesnúť tlak z princípu zachovania energie, na vydutej strane sa prúdenie spomalí, pretože preteká cez väčší prierez (prúdnice sú ďalej od seba) ak sa teda prúdenie spomalí tak narastie tlak. Takýmto spôsobom sa dá vysvetliť rozdiel tlakov na spodnej a vrchnej strane lopatky. Pribeh tlakov na stranách lopatky je znázornený na obr. 4.9. [27]

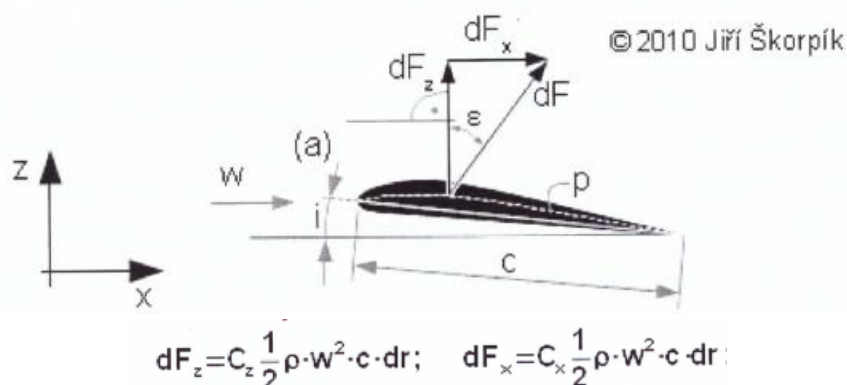


Obr. 4.9 Prúdnice znázorňujúce prúdenie okolo profilu spolu s priebehom tlakového súčiniteľa pre b) pretlakovú stranu (spodnú) a a) saciu stranu (vrchnú), kde tlakový súčiniteľ je definovaný ako $c_t = \frac{p_i - p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2}$ [-], kde p je statický tlak a p_i je tlak v danom mieste lopatky [27]

Dôsledkom rozdielnych tlakov na opačných stranách lopatky je sila pôsobiaca na profil od prúdiacej tekutiny. Je tiež dôležité podotknúť, že rozdielu tlakov sa dá dosiahnuť aj pri obtekaní symetrického profilu, ak je voči prúdu vychýlený šikmo. [27]

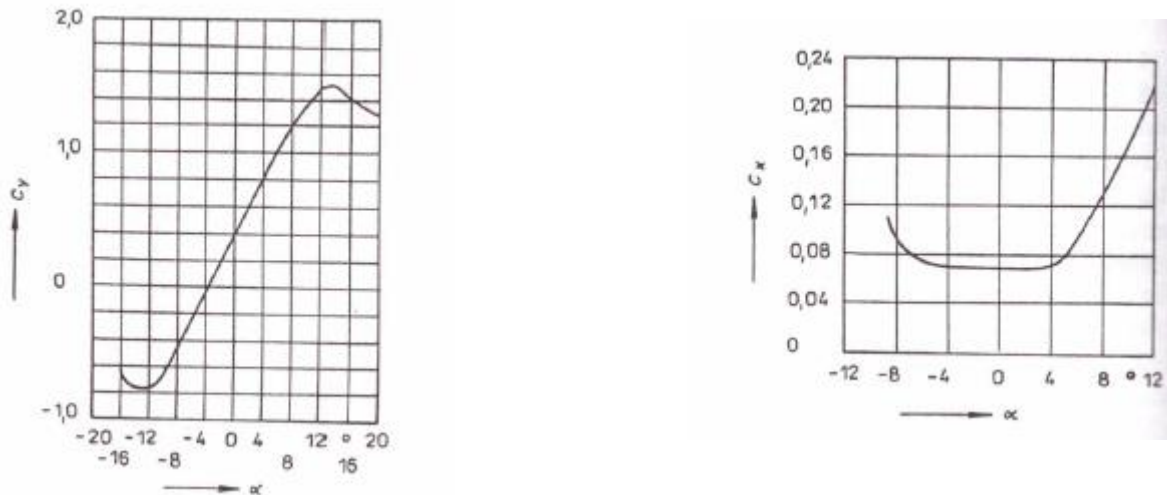
4.3.1 Aerodynamika osamoteného profilu

Ako už bolo spomenuté, pri obtekaní profilu vzniká od tekutiny na profil sila. Táto sila však nesmeruje presne kolmo na profil, dá sa však rozložiť na zložky. Trením tekutiny o profil spolu s tvarovým odporom profilu (rozdiel tlakov na krajoch profilu v smere prúdenia) sa vytvára odporová sila, ktorá má smer zhodný so smerom nátokovej rýchlosti na profil, označuje sa F_x . Zložka sily kolmá na nátokovú rýchlosť sa nazýva vztlaková sila a označuje sa F_z . [27] Obe tieto sily sa dajú vyjadriť ako časť dynamického tlaku nátokovej rýchlosti pomocou koeficientu odporu a koeficientu vztlaku. Tieto koeficienty sa síce dajú vypočítať, ale v praxi sa merajú v aerodynamickom tunely a sú závislé na režime prúdenia teda na Reynoldsovom čísle a uhle nábehu (viac v kapitole 5.). Silové pomery udáva obr 4.10.

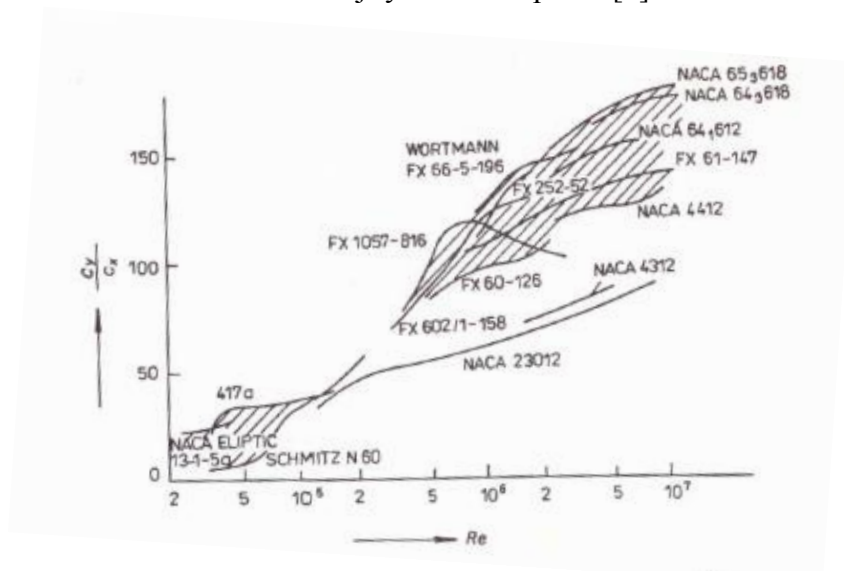


Obr. 4.10 Aerodynamika osamoteného profilu spolu so vzťahmi pre sily pôsobiace na profil, kde c_z [-] je vztlakový súčiniteľ, c_x [-] je odporový súčiniteľ, w [m/s] je nátoková rýchlosť (relatívna rýchlosť prúdenia), p je stredná čiara profilu, c [m] je tetiva profilu a i je uhol nábehu označovaný tiež ako α [°] (uhol medzi tetivou profilu a nátokovou rýchlosťou) [27]

Ako už bolo spomenuté, koeficient vztlaku a odporu závisia od Reynoldsovho čísla a uhlu nábehu, dané závislosti spravidla vyzerajú nasledovne.



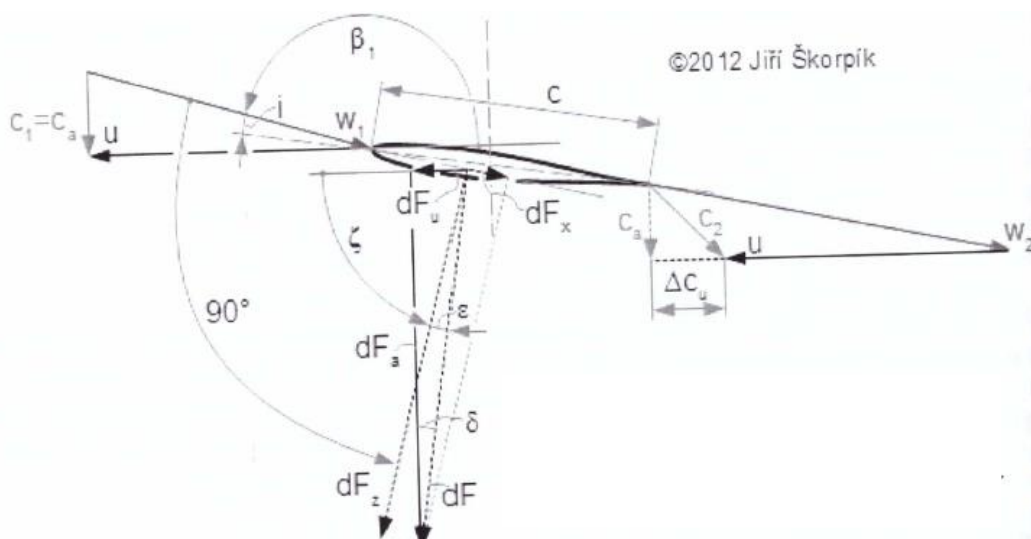
Obr. 4.11 Závislosť koeficientov vztlaku (na obrázku označený ako c_y) a odporu na uhle nábehu nátokovej rýchlosti na profil [6]



Obr. 4.12 Závislosť pomeru koeficientov vztlaku a odporu na Reynoldsovom čísle. Je vidieť, že pri nízkych Re sa zväčšuje vplyv trenia na celkový odpor profilu a odporový koeficient narastá [6]

4.3.2 Aerodynamika lopatkovej mreže veternej turbíny

Rozloženie síl v rámci už reálne rozostavených lopatiek turbíny je iné ako je to v prípade osamoteného profilu. Celková sila od prúdu na profil zostáva rovnaká, mení sa však rozklad sily, celková sila sa nerozkladá na odporovú a vztlakovú, ale pre lopatkovú mrežu respektíve turbínu je dôležitý rozklad do smeru rotácie (obvodového) a smeru axiálneho. Keďže je pri rotácii nátoková (relatívna) rýchlosť pod uhlom vzhľadom na rovinu rotácie tak vztlaková sila nepôsobí presne do tohto smeru a je tiež pod uhlom. Preto je nutné rozložiť silu do obvodového smeru, pretože až táto sila vytvára krútiaci moment.



Obr. 4.13 Aerodynamické charakteristiky profilu v lopatkovej mreži veternej turbíny. Kde u [m/s] je obvodová rýchlosť, c_a [m/s] je axiálna rýchlosť v rovine rotoru a w [m/s] je relatívna rýchlosť. Uhol β [°] je uhlom relatívnej rýchlosti vzhľadom na rovinu rotácie [27]

Ako je z obr. 4.13 viditeľné obvodová sila F_u je oproti vztlakovej veľmi malá. Je to však daň za to, že má lopatka relatívne veľké otáčky. Ak by bola obvodová rýchlosť menšia, aj lopatka by mohla byť otočená voči rovine rotácie tak, že by bola obvodová zložka aerodynamickej sily kúsok väčšia (stále ide o to, aby bola nátoková rýchlosť pod ideálnym uhlom voči profilu, ak sa zmení smer nátokovej rýchlosti, aj profil by sa mal natočiť tak, aby ho prúd obtekal pod ideálnym uhlom inak vzniknú straty). Je však na mieste si uvedomiť, že z energetického hľadiska je práca vyvedená časťou profilu súčinom obvodovej zložky sily a obvodovej rýchlosti, takže u päty lopatky je väčšia sila a malá obvodová rýchlosť a na špičce je väčšia obvodová rýchlosť a menšia obvodová sila.

4.4 Veterné stroje vhodné pre zastavané oblasti

Podmienky kladené na veterný stroj do obývaných oblastí

- **1. Spol'ahlivosť**- veterné zariadenie pre mestské prostredia musí byť jednoznačne čo najspol'ahlivejšie, preto by malo byť vytvorené z čo najkvalitnejšieho materiálu s vysokou životnosťou, tiež ložiska rotoru by mali byť čo najspol'ahlivejšie a mali by mať vysokú životnosť, to isté platí aj pre generátor. Pretože nikto nechce, aby musel v pravidelných intervaloch ísť na strechu-málo prístupne miesto opravovať zariadenia.
- **2. Bezpečnosť**- bezpečnosť zariadenia musí byť jeho prioritou, či už sa jedná o namáhanie lopatiek rotoru, alebo samotného uloženia zariadenia na streche, ktoré by malo byť konzultované so statikom. Lopatky turbíny by mali byť čo najviac vystužené najmä pri päte lopatky, kde pôsobí najväčší ohybový moment. Preto je najvhodnejšie zariadenie riadne otestovať aj v nepriaznivých podmienkach ako môže byť napríklad víchrica.
- **3. Malá plocha rotoru**- tento bod priamo súvisí s bezpečnosťou, zariadenie by malo vystavovať vetru čo najmenšiu plochu z dôvodu tlaku, ktorý vietor vytvára na zariadenia a pri istých podmienkach by mohol zariadenie poškodiť, či poškodiť jeho

záves. Preto je vhodné voliť zariadenie, ktoré dokáže aj pri menšej ploche premeniť požadované množstvo energie.

- **4. Účinnosť**- účinnosť tiež súvisí s predošlým bodom, pokiaľ je daný výkon zariadenia, je vhodné voliť typ zariadenia, ktoré má vyššiu účinnosť, potom môže mať zariadenie menšiu plochu a koniec koncov je bezpečnejšie. Tiež je nutné myslieť na to, že výkon vetra samotný je nízky a zariadenie s nízkou účinnosťou tento fakt ešte zhorší a konečný výkon zariadenia bude ešte nižší.
- **5. Otáčky**- otáčky zariadenia je nutné voliť podľa generátora. Vo všeobecnosti generátoru elektrického prúdu vyhovujú vyššie otáčky a to aspoň okolo 10 ot/s. Tomuto faktu nahráva rýchlobežné zariadenia pretože sa nemusí riešiť prevod a rotor môže byť spojený priamo s generátorom. Prevod na vyššie otáčky u pomalobežných zariadení zase znižuje konečný výkon pretože aj v prevode dochádza k stratám energie.
- **6. Jednoduchosť**- je viac než vhodné aby zariadenie bolo čo najjednoduchšie a obsahovalo čo najmenej súčastí, pretože súčiastka ktorá na zariadení nie je sa nemôže pokaziť. Tiež z ekonomického hľadiska je viac než vhodné aby zariadenie obsahovalo čo najmenej súčiastok a nebolo tak zbytočne predražené. Zariadenie by však malo obsahovať všetky bezpečnostné prvky, ako napríklad brzdu.
- **7. Cena**- cena zariadenia je tiež jeden z určujúcich faktorov. Priamo súvisí s množstvom použitých súčiastok ako aj s procesom ich vyhotovenia.
- **8. Variabilita zariadenia**- touto podmienkou je schopnosť stroja pracovať aj pri premenných rýchlostiach vetra a napríklad aj pri premenných otáčkach. Tiež je variabilitou zariadenia myslené ako sa stroj správa pri turbolentnom prúde, či pri premennosti smeru vetru.

Zhodnotenie veterných strojov na základe spomenutých požiadaviek

Zhodnotenie požiadavkou bude vytvorené len pre najbežnejšie typy veterných strojov z dôvodu, že tieto zariadenia sú odskúšané a sú známe ich výhody a nevýhody. Tiež je nutné uviesť, že porovnanie by malo byť spravené pre stroje s rovnakým výkonom aby bolo možné vyhodnotiť správne podmienky plocha rotoru a účinnosť. Zariadenie je používané pre nabíjanie batérií a teda generátor môže mať rôzne otáčky, z čoho sa odvíja variabilita zariadenia, ak by bolo napojené na sieť, generátor by musel mať konštantné otáčky alebo by bol potrebný frekvenčný menič, čo by cele zariadenie predražilo. Poznatky sú prebraté zo zdrojov [2] a [6].

Tab. 4.1 Vyhodnotenie podmienok kladených na veterné zariadenie pre vybrané typy zariadení [autor]

Typ zariadenia	Spoľahlivosť	Bezpečnosť	Plocha rotoru	Účinnosť	Otáčky	Jednoduchosť	Cena	Variabilita
Savoniov rotor	Nemá príliš veľa dielov ani prvkov na reguláciu, teda je spoľahlivý	Keďže je rotor pomalobežný, jediným problémom môže byť veľký tlak pôsobiaci na plochu rotoru	Relatívne veľká, pretože tento rotor má malú účinnosť	Nízka	Nízke-nutnosť použiť prevod	Jednoduché zariadenie, je potrebné však použiť prevod pri použití generátoru	Nízka	Turbolencie-znížia účinnosť ale stroju zásadne neškodia Otáčky- pri zmene rýchlosti vetra Smer-variabilný
Darreiiov rotor	Darreiiov rotor musí obsahovať zariadenie na rozbeh, o to je zložitejší a možno aj menej spoľahlivý	Pokiaľ sa dobre spracuje tak zariadenie môže byť bezpečné, znova, problém môže byť uchytenie na strechách	Tiež relatívne veľká, vyplývajúca z nízkej účinnosti zariadenia	Medzi nízkou a vysokou	Nízke-nutnosť použiť prevod	Zložité zariadenie, nutnosť použitia prevodu a zariadenia na rozbeh na provozné otáčky	Vysoká-špeciálne lopatky a nutnosť zaobstaráť si zariadenie na rozbeh	Turbolencie-nevhodné Otáčky- len malá zmena ot. pri zmene rýchl. vetra Smer-Variabilný
Rotor vrtnúvového typu	Obsahuje málo prvkov, záleží teda na generátore v otázke spoľahlivosti	Problémom môžu byť vysoké otáčky, ktoré spolu s tlakom od vetra namáhajú lopatky	Toto zariadenie môže dosahovať vysokú účinnosť, teda plocha je nízka	Vysoká	Vysoké-bez nutnosti použitia prevodu	Jednoduché zariadenie, zložitá je len výroba špeciálneho profilu	Stredne vysoká	Turbolencie-nevhodné Otáčky- premenné pri zmene rýchlosti vetra Smer- smerové vodítko
Veterné koleso	Neobsahuje príliš veľa pohyblivých častí, môže sa teda považovať za spoľahlivý	Otáčky v tomto prípade nebudú problém, jediný problém môže znova nastať pri uchytení zariadenia na strechách	Relatívne veľká z dôvodu nízkej účinnosti	Nízka	Nízke-nutnosť použiť prevod	Jednoduché zariadenie, obsahuje však veľké množstvo lopatiek, ktoré sú však tvarovo jednoduché	Nízka, záleží na množstve a veľkosti lopatiek	Turbolencie-nevhodné Otáčky- podľa rýchlosti vetra Smer- smerové vodítko

4.4.1 Najvhodnejšie zariadenie pre mestské prostredia

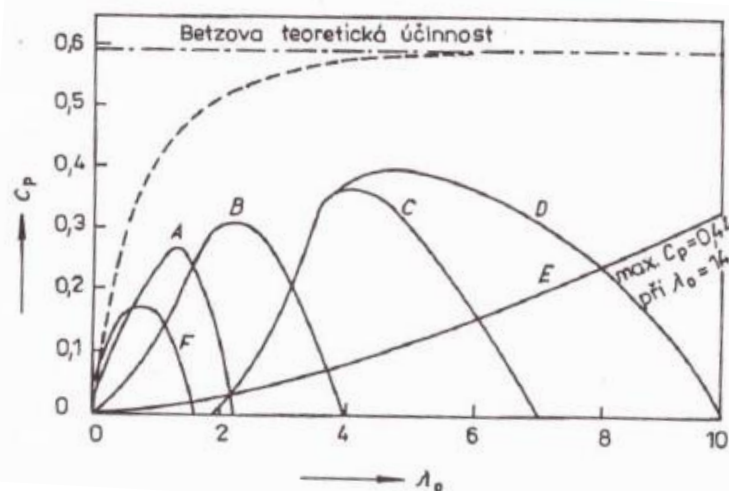
Ako je vidieť z tabuľky 4.1, každý zo strojov isté výhody (zelená), nevýhody (červená) alebo je daná vlastnosť neutrálna a záleží od použitia a konkrétnej aplikácie, či je tento typ stroja vhodný alebo nie.

Viditeľne najhoršie dopadol v porovnaní Darreiov rotor, ktorý sa zrejme nehodí do mestských prostredí pretože na rozbeh vyžaduje rozbehové zariadenie. Tiež jeho variabilita voči rýchlosti vetra nie je úplne dobrá, keďže pracuje dobre len pri menovitých otáčkach. Darreiove rotory vo všeobecnosti nie sú veľmi rozšírené.

Ďalším menej vhodným adeptom je veterné koleso, ktorý má najväčšiu nevýhodu v jeho nízkej účinnosti, teda aj jeho plocha by mala byť pri dodržaní istého výkonu väčšia, čo hrá znova proti bezpečnosti zariadenia. Jeho variabilita tiež nie je ohromná a koniec koncov sa teda príliš nehodí do mestských prostredí na výrobu elektriny. Jeho využitie sa nájde napríklad v odľahlých oblastiach bez elektriny kde je využitý na čerpanie vody.

Už vhodnejším adeptom je Savoniov rotor. Má síce nízku účinnosť, ale je veľmi jednoduchý na výrobu. Tiež mu hrá do kariet jeho variabilita pri zmene smeru vetra. Dokáže pracovať aj pri veľmi malej rýchlosti vetra, je však otázne, či pri malej rýchlosti vetra bude mať zariadenie energetický úžitok. Jeho výhodou je tiež to, že mu zo všetkých typov strojov najmenej vadia turbolencie. [2] Funkčná plocha listu rotoru je v tomto prípade veľká a tak príliš nevádi, keď prúdenie má kúsok iný smer ako kolmý na túto plochu. Tiež tvar plochy uľahčuje zachytávanie aj turbolentného prúdenia a teda energetický výťažok je nejaký. V prípade rotorov s aerodynamickým profilom by sa pri turbolentnom, teda premennom prúdení mohol značne meniť uhol nábehu prúdenia a profil by mohol do značnej miery stratiť vztlak.

Ako zrejme najvhodnejší kandidát z porovnania vyšiel rotor vrtuľového typu. Pri priamom napojení rotoru na generátor obsahuje najmenej súčiastok. Jeho účinnosť je najvyššia, a v dobrom prevedení aj dvojnásobne väčšia ako pri predošlých typoch strojov, z čoho vyplýva, že môže mať najmenšiu plochu rotoru a teda bude najbezpečnejší z pohľadu uchytania stroja na strechách. Jeho vysoké otáčky nahrávajú generátoru, ktorý pracuje najideálnejšie pri vyšších otáčkach. Ako už bolo napísané, zle na neho vplývajú turbolencie. Má však relatívne dobrú variabilitu vzhľadom na otáčky a teda aj premennú rýchlosť vetra.



Obr. 4.14 Závislosť výkonového súčiniteľa rôznych druhov veterných zariadení na súčiniteli rýchlobežnosti (teda otáčkach) [6]. A- veterné mnoholopátkové koleso, B- štvorlopatkový veterný mlyn, C- rotor Darreious, D- rotor vrtuľového typu a s 2 lopatkami, E- konkrétny typ veternej turbíny so 100 kW a rýchlobežnou vrtuľou, F- Savoniov rotor, čiarkovaná- ideálny rotor s nekonečným počtom lopatiek a nulovým odporom.

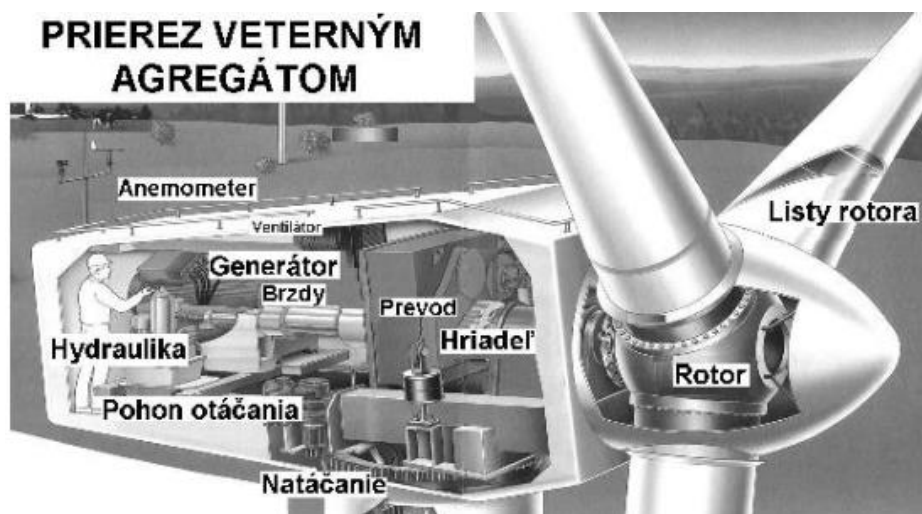
Pre uvedené zdôvodnenia sa práca teda bude zameriavať na návrh stroja s rotorom vrtuľového typu. Ako bolo napísané, zariadené musí byť navrhnuté tak, aby bolo čo najbezpečnejšie. Tiež pre mestské prostredia je viac než vhodné aby bolo zariadenie variabilné pri zmene rýchlosti vetra. Ako však bude ukázané v kapitole 5., variabilita zariadenia je potrebná vzhľadom na návrhovú rýchlosť vetra len veľmi malá a to v jednotke m/s, z dôvodu výskytu rýchlostí o istej energetickej hladine a ich početnosti.

4.5 Konštrukcia veternej turbíny vrtuľového typu

Okrem vrtuľových listov teda lopatiek turbíny obsahuje veterná turbína vrtuľového typu viacero komponentov, aby zaistili polohu, či zaistili prevod energie z lopatiek na generátor. Jedná sa predovšetkým o tieto komponenty

- Rotorové lopatky
- Náboj a rotor
- Prevodovka (pri malých strojoch nemusí byť)
- Generátor
- Brzda a regulačné zariadenia

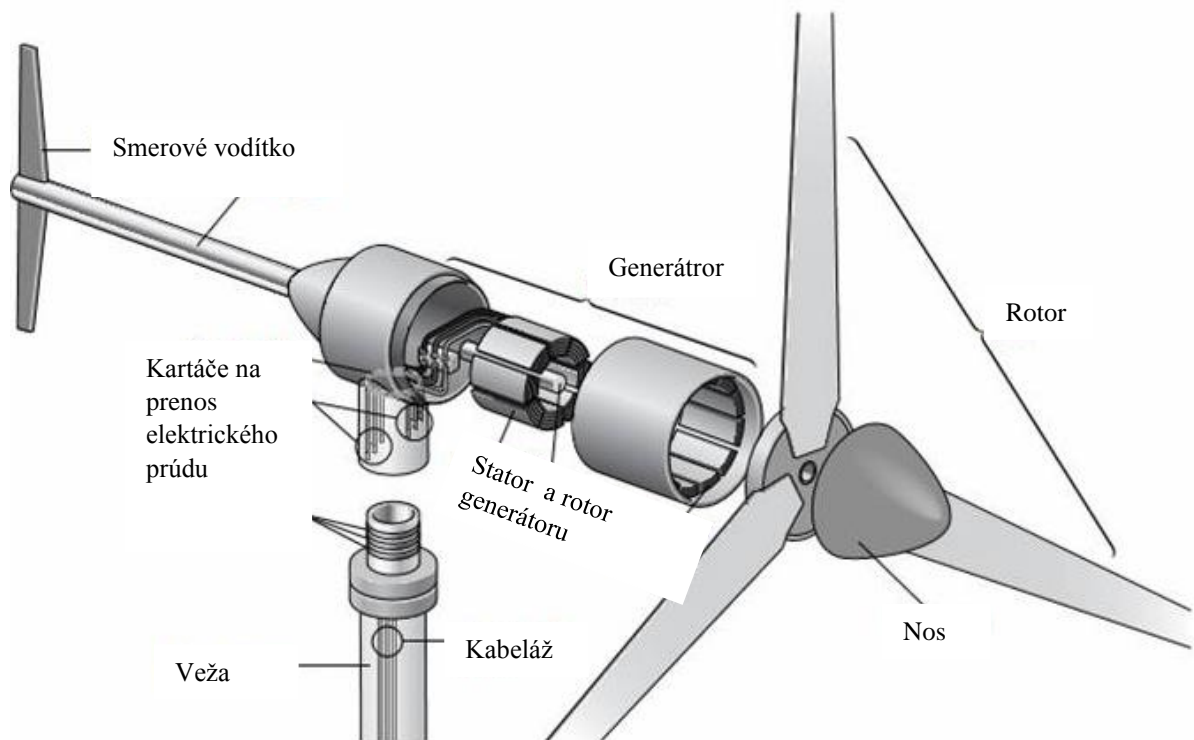
Usporiadanie daných komponent ukazuje nasledujúci obrázok



Obr. 4.15 Prierez veternou turbínou konvenčného typu [28]

Obrázok 4.15 ukazuje usporiadanie komponent v konvenčnej veternej turbíne s výkonom v rádoch kW. Malá veterná turbína pre mestské prostredie môže byť však omnoho jednoduchšia. Vďaka použitiu pre nabíjanie batérií nemusí mať generátor konštantné otáčky, a tie tam môžu dosahovať nižšie hodnoty. Zároveň ako bolo uvedené v predošlej kapitole, ideálne zariadenie do mesta je s dvoma lopatkami a tým pádom má vysoké otáčky (podľa obr. 4.14), výsledkom tohto je, že rotor s lopatkami môže byť priamo spojený s generátorom. Takéto riešenie majú takmer všetky komerčne predávané malé veterné turbíny. Tiež natáčanie malých veterných turbín môže byť riešené len s pomocou smerového vodítka. Vo väčšine prípadov sa môže tiež vynechať hydraulika za účelom natáčania listov. Je však otázne či vynechať brzdu alebo nie, z bezpečnostného hľadiska sa určite nesmie vynechať, v niektorých prípadoch je však použitá elektromagnetická brzda, teda využitie generátoru pre brzdenie. [28]

Príkladom zjednodušenia konštrukcie malej veternej turbíny je obr. 4.16.



Obr. 4.16 Zjednodušené konštrukčné riešenie malej veternej elektrárne [29]

Práca však nie je založená na hľadaní ideálneho konštrukčného riešenia malej veternej elektrárne. Preto jednotlivé konštrukčné typy nebudú ďalej riešené. Taktiež nebude ďalej riešené ani napojenie stožiaru na opernú konštrukciu na streche aj keď je táto problematika pre problém malých veterných turbín veľmi dôležitá. Cieľom práce je predovšetkým návrh rotoru ako zo strojárskoho pohľadu najdôležitejšej časti.

4.6 Zapojenie veternej turbíny

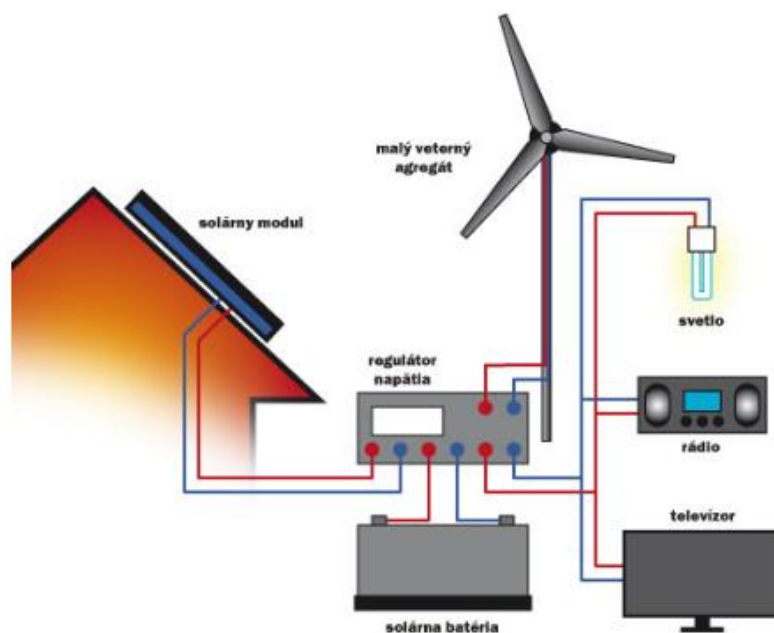
Okrem samotného rotoru s generátorom musí veterné zariadenie na výrobu elektriny obsahovať aj iné súčasti, aby bola distribúcia elektriny k spotrebiču úspešná. V zásade existujú dva typy zapojení a to zapojenie k sieti a zapojenie bez napojenia k sieti (tzv. ostrovný systém).

4.6.1 Ostrovný systém zapojenia

Tento systém je nezávislý od rozvodnej siete, je výhodný pre elektrárne s výkonom od 0,1 do 5kW. Jeho dominantným prvkom sú akumulátory, ktoré v obdobiach prebytku energie uschovávajú energiu. Systém tiež musí obsahovať riadiacu elektroniku, teda hlavne regulátor napätia a regulátor nabíjania, ktorý upravuje chod a výstupy z veterného zariadenia v závislosti na stave akumulátorov. Ako výstupy z batérie môže byť jednosmerný prúd

s nízkym napätím 12 alebo 24 V. Pre komerčné spotrebiče je však nutné použiť menič napätia striedavého prúdu o hladine napätia 230 V. [28]

Systém je veľmi výhodné skombinovať so solárnymi panelmi. Takýto systém je oveľa spoľahlivejší z pohľadu dodávky energie, pretože veľmi často sú slnečné dni sprevádzané bezvetrím a naopak veterné dni bez slnečného svitu. Z ekonomického hľadiska to dáva tiež zmysel pretože systém nepotrebuje žiadne ďalšie zariadenia, ak sú pripojené k regulátoru aj solárne panely.

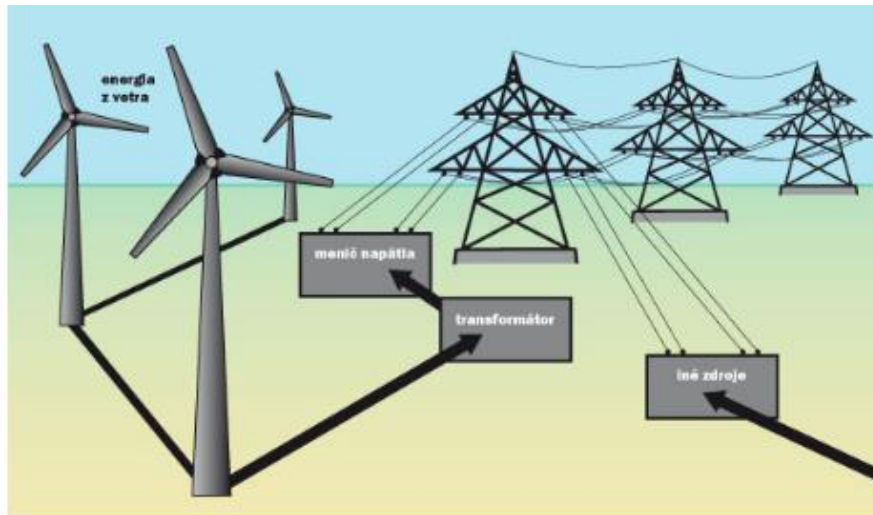


Obr. 4.17 Zapojenie ostrovného systému spolu s potrebnými zariadeniami [28]

Ako je vidieť z obr. 4.17, ostrovný systém potrebuje okrem zariadení na získavanie energie aj regulátor a hlavne akumulátory, ktorých cena je značne vysoká. Preto je aj cena celého systému značne vysoká. Pre chod veterného zariadenia je však dôležité aby mohlo pracovať s variabilnými otáčkami (hlavne pri štarte a pri premennom vetri). Ekonomické hľadisko tohto systému je však nelichotivé a preto treba uvážiť aj vynechanie všetkých zariadení a napojiť veternú turbínu na rozvodnú sieť.

4.6.2 Systém pripojený na rozvodnú sieť

Systém zapojenia veternej turbíny na rozvodnú sieť je značne jednoduchší. Priamo na sieť je možné zapojiť veternú turbínu len v prípade že by na turbínu bol zapojený generátor striedavého prúdu, ktorý dodáva striedavý prúd o danej frekvencii a istej hladine napätia. Veterná turbína by musela mať konštantné otáčky, kvôli frekvencie v sieti, ktorá by si tieto otáčky cez generátor držala. Z toho vyplýva aj problém pri štarte veternej turbíny, kedy by sa turbína mohla k sieti nafázovať až pri dosiahnutí provozných otáčok. Preto by systém musel znova obsahovať ďalšiu elektroniku, ktorá by tento problém vyriešila. [28] Tento problém však veľmi nenahráva variabilite veternej turbíny, ktorá by mohla pracovať len s konštantnými otáčkami a pri kolísaní rýchlostí vetra by vznikali zbytočné straty. Systém tiež musí obsahovať transformátor napätia, pretože napätie na výstupe z generátoru je iné ako napätie v sieti. (Komerčné veterné elektrárne však obsahujú asynchrónny generátor spojený s usmerňovačom a striedačom, ktorý je už napojený na sieť)



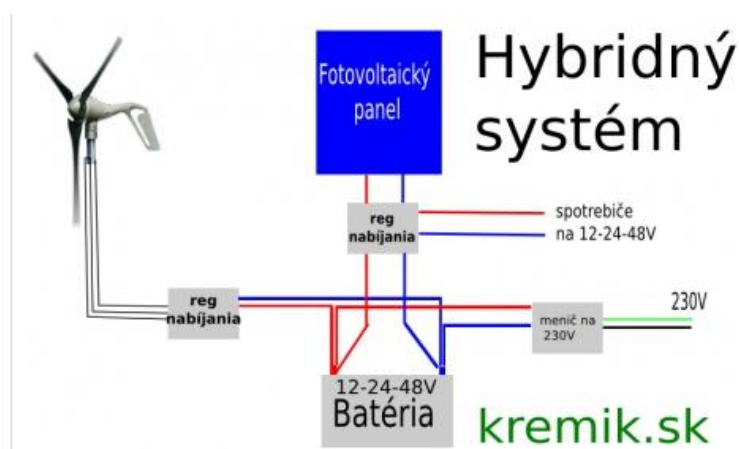
Obr. 4.18 Systém napojenia veterných elektrární na rozvodnú sieť [28]

4.6.3 Systém zapojenia vhodný pre mestské prostredia

Ako už bolo napísané, veterný stroj aj jeho zapojenie musí byť čo najjednoduchšie, čo najlacnejšie a ešte k tomu aj čo najvariabilnejšie.

Tieto požiadavky sa dajú splniť len zlúčením oboch spomínaných systémov. Z ekonomického hľadiska je nutné vynechať akumulátory kvôli ich cene. Z hľadiska variabilnosti otáčok a štartu je nutné vynechať priame zapojenie na sieť, ale zapojenie na sieť zanechať.

Je tak vhodné nechať v systéme regulátor napätia a otáčok, z dôvodu bezpečnosti a ochrane samotnej veternej turbíny. Kvôli premenným otáčkam a zapojeniu na sieť, kde je frekvencia aj napätie konštantné je nutné do systému zahrnúť frekvenčný menič a transformátor napätia. Takto sa získa systém veterného zariadenia spolu so solárnymi panelmi, ktorý aj pri premenných výstupoch (napätia, frekvencie) dokáže dodávať výkon do siete a teda tento výkon buď predávať, alebo využívať sieť ako virtuálnu batériu. Netreba však zabúdať na to, že primárne by mala energia prúdiť do domov a budov a len v prípade prebytku by mala energia prúdiť do siete.



Obr. 4.19 Schéma zapojenia malej veternej elektrárne, kde je vidieť, že zariadenie dokáže pracovať s viacerými hladinami napätia a tiež to, že dokáže dodávať energiu do akumulátora ako aj do siete (v prípade potreby sa akumulátor môže vynechať) [33]

Popis funkcie schémy nabíjania z obr. 4.19:

Veterná elektrárňa vyrába pomocou generátora (asynchrónny) trojfázový elektrický prúd na hodnote napätia 12V alebo 24V, ktorý sa privedie do regulátora a ten striedavé napätie usmerní na jednosmerné a nabíja batériu. Po nabití batérie regulátor batériu odpojí a energiu privádza cez menič napätia (na hodnotu 230 V). Pričom je nutné využiť aj funkciu frekvenčného meniča aby veterné zariadenie mohlo pracovať s premennými otáčkami a na výstupe by mohla byť konštantná frekvencia siete. Pri nepriaznivých podmienkach napríklad pri priveľmi vysokých otáčkach turbíny začne regulátor brzdiť otáčky cez elektromagnetickú brzdu. [33] Takto teda funguje schéma zapojenia veternej turbíny pre potreby nabíjania akumulátorov a s možnosťou dodávky prebytočnej energie do siete. Záleží však na konkrétnej aplikácii ako aj ekonomickej štúdii aplikácie, či je výhodnejšie zahrnúť akumulátory alebo energie len jednoducho dodávať do siete.

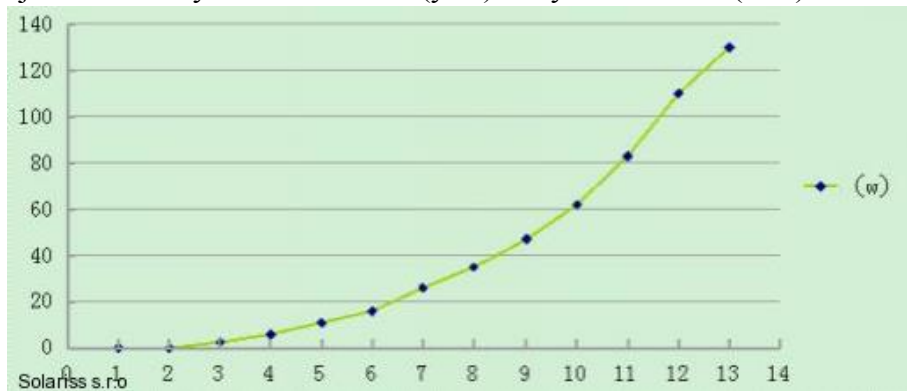
4.7 Komerčne predávané malé veterné turbíny

Male veterné elektrárne sa dajú v dnešnej dobe veľmi ľahko kúpiť. Dajú sa kúpiť v rôznych setoch, človek si môže kúpiť len samotný rotor, rotor so stĺpom, rotor so stĺpom a generátorom, prípadne sa dá kúpiť úplne celé veterné zariadenie aj so systémom zapojenia (regulátor, akumulátory...). Samozrejme jednotlivé diely sa dajú kúpiť aj samostatne a tak existujú ľudia, čo si v rámci voľného času napríklad vyrobia rotor a ostatné komponenty si len dokúpia.

Ako to už ale vo svete obchodu býva, vo veľa prípadoch v očiach kupujúceho víťazí najvýhodnejšia cena. A to isté platí aj pri kúpe malých veterných turbín. V rámci predaja na internete sa dajú kúpiť veľmi lacné turbíny. Netreba sa však nechať obľafnúť, v rámci môjho hľadania na internete som narazil na cenovo lákavé ponuky. Spravidla je však najlacnejšia ponuka veternej turbíny sprevádzaná len veľmi stručnými informáciami o danom zariadení. V najhoršom bol pri turbíne uvedený len výkon a (asi) priemer rotoru. Je tak ľahké kúpiť podozrivé a pravdepodobne nevyhovujúce zariadenie. Preto je vhodné uviesť 1. odporúčanie:

- Veterná turbína je komplexné zariadenie, ktoré pracuje s premennými podmienkami a jeho technologické nadväznosti tiež nie sú úplne elementárne pri zachovaní cieľa úspešného zapojenia a funkcie celého systému. Preto by špecifikácia pri kúpe turbíny mala obsahovať viaceré informácie ako je to napríklad pri turbíne M300 z webu [34]
 - Priemer vrtule: cca 820 mm
 - Hmotnosť: cca 8 kg
 - Priemer rúrky stojanu: cca 50 mm
 - Inicializačná rýchlosť vetra: cca 2,5 m.s
 - Napätie: 12 24 VDC
 - Menovitý výkon: 100 W pri cca 12 m.s
 - Max. rýchlosť vetra: cca 45 m s
 - Max. výkon 270w
 - Material :Telo Alu
 - Rotor Nylon+ 30% Sklolaminat
 - špeciálny dizajn lopatiek pre zníženie hluku max 35db/10m
 - magnetický materiál generátora NdFeB
 - hriadeľ rotoru nerez oceľ
 - spojovací materiál nerez oceľ
 - Technické parametre:
 - Menovitý výkon: Generator max 300w
 - Pracovný prúd: max 25 12A.
 - Typ nabíjania : PWM
 - Operačná teplota -35C ~ +55 C
 - Rozmery (cca) 440 × 366 × 166 mm
 - Systémové napätie : 12 16-24-26V
 - LCD: Prud(A), Vyrobená elektrina KW, atd.
 - - ochrana pred bleskom
 - - proti prebitiu a vybitiu akumulátoru
 - - proti skratu a preťaženiu
 - - proti spätnému vybitiu
 - - Brzdenie a regulácia otáčok generátora pri vychrici, alebo pri nabitých batériach.
 - - Manualná brzda

Ďalšou dôležitou súčasťou kompletnej špecifikácie zariadenia je aj výkonová krivka turbíny, ukazuje závislosť výkonu zariadenia (y os) na rýchlosti vetra (x os)



Obr. 4.20 Výkonová krivka turbíny M300 ako príklad vhodne uvedenej špecifikácie turbíny [34]

Problém dostupných malých veterných elektrární vidím tiež v ich dimenzovaní.

Drvivá väčšina zariadení má menovitú teda návrhovú rýchlosť vetra okolo 12 m/s. Je potom jasné, že aj turbína s priemerom jeden meter môže mať kľudne výkon aj 100 W. Beauftova stupnica uvedená v kapitole 2.5.1 uvádza, že táto rýchlosť vetra je charakterizovaná ako silný vietor a tiež uvádza, že pri takejto rýchlosti vetra sa ťažko pohybuje pri chôdzi. Ako bude uvedené v kapitole 5. maximálna rýchlosť vetra v meste Brno je vo výškovej hladine striech domov len tesne nad 8 m/s a takáto rýchlosť bola zaznamenaná len jeden-krát v roku 2019. Preto je nutné uviesť 2. odporúčanie:

- Väčšina komerčne dostupných zariadení je navrhnutých na rýchlosť vetra zhruba 12 m/s, čo v našich podmienkach znamená, že zariadenie by pracovalo pri stave dost' vzdialeného od toho návrhového. Pri rýchlosti vetra prevládajúcej v našich zemepisných šírkach by sa turbína aby vôbec fungovala musela točiť značne nižšími otáčkami, čo by značne znižovalo zužitkovanú energiu a hlavne znižovalo účinnosť generátoru (ktorá je najvyššia pri menovitých otáčkach, pri nemenovitých môže byť výrazne nižšia). Preto je lepšie vybrať si zariadenie navrhnuté na nižšiu rýchlosť vetra (medzi 4-6 m/s), vhodné pre veterné podmienky strednej Európy ak vôbec také zariadenie existuje.

4.8 Veterný stroj pracujúci na princípe kmitania

Novinkou vo svete veternej energie, špeciálne uvádzanou ako novinkou v oblasti veternej energetiky v mestách je veterný stroj pracujúci na princípe kmitania. Princípom jeho fungovania je periodické odtrhávajúce vírov vznikajúcich pri obtekaní telesa, ktoré rozkmitajú dané teleso a toto kmitanie sa pomocou prevodu prenáša na generátor elektrického prúdu.

Ako aj názov práce napovedá, veterne turbíny nie sú jediné možné zariadenia, ktoré dokážu transformovať energiu z vetra na využiteľnú formu. Stroje pracujúce na princípe kmitania však sú zatiaľ len novinkou, o ich konkrétnych prevedeniach je známe len málo. Málo sa toho vie aj o tom, koľko dokážu takéto stroje vôbec zužitkovať energie, vo všeobecnosti sa však o nich pojednáva ako o mikroenergetických zdrojoch s výkonom v rádoch mW. O tých ale táto kapitola hovoriť nebude, bližšie sa uvedie zariadenie, ktoré svojim výkonom môže konkurovať bežným veterným turbínam.

Veľa z týchto zariadení sa môže využiť ako napájanie ťažko dostupných prístrojov, ktoré na svoje fungovanie nepotrebujú príliš veľa energie. Existujú však aj koncepty kmitajúcich elektrární, ktoré by mohli s výkonom konkurovať aj malým veterným turbínám. Tieto zariadenia majú samozrejme veľa výhod, ale ako už býva zvykom, majú aj veľa nevýhod, ktoré ich dobré vlastnosti degradujú.

4.8.1 Vznik vírov pri obtekaní telies

Vznik vírov pri obtekaní telesa popísal už v minulom storočí vedec Theodore von Karmán. Presný popis vzniku Karmánovej vírovej ulice nie je pre potreby práce potrebný a preto zoberiem vznik vírov pri obtekaní prekážky ako fakt, bez detailného popisu. V stručnosti ide o, že pri obtekaní prekážky, pri istej rýchlosti, vznikajú za prekážkou dva víry (z každej strany prekážky jeden), nie sú však rovnaké v konkrétnom časovom okamihu a periodicky rastú a odtrhávajú sa od prekážky. [35]

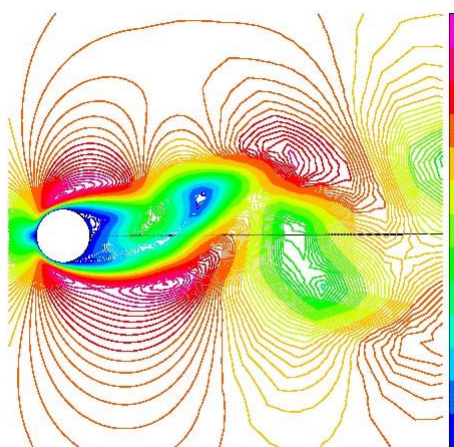
Čo je ale nutné poznamenať, tieto víry nevznikajú pri obtekaní prekážky vždy, vznikajú až od istej mieru režimu prúdenia, ktoré charakterizuje Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{D \cdot v}{\nu} \quad [-] \quad (4.30)$$

Kde D [m] je charakteristický rozmer prekážky, v [m/s] je rýchlosť prúdenia a ν [m².s⁻¹] je kinematická viskozita vzduchu. Zdroj [35] uvádza, že hodnota Re , kedy sa začínajú tvoriť víry je $47 < Re_d < 10^5$ pre prekážku kruhového tvaru. Je teda jasné, že na to, aby zariadenie fungovalo stačí aj malá rýchlosť vetra, je však potom nutné k tejto rýchlosti priradiť aj rozmer zariadenia tak aby víry vznikali.



Obr. 4.21 Karmánová vírová ulica pri obtekaní telesa kruhového tvaru [35]



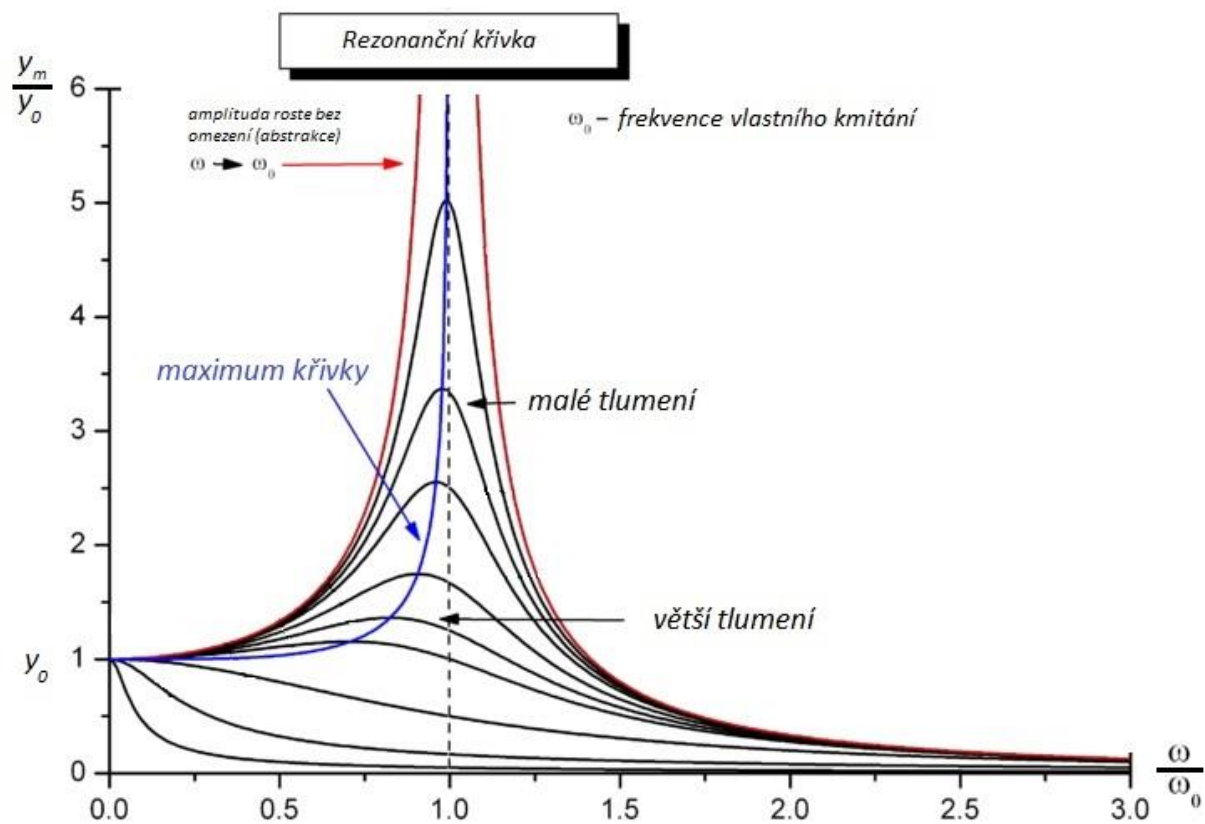
Obr. 4.22 Rýchlostné pole v jednom konkrétnom okamžiku pri tvorbe vírov (podobne sa mení aj tlakové pole v okolí prekážky) [36]

Ako už bolo napísané, víri tvoriace sa periodicky od prekážky odtrhávajú. Toto odtrhávajúce súvisí samozrejme aj s rozložením rýchlostí a tlakom okolo prekážky. Odtrhávajúce vírov teda pôsobí na tlakové pole v okolí prekážky a teda aj tlakové pole sa periodicky mení a teda vytvára periodické silové pôsobenie na prekážku. Frekvencia odtrhávania však nie je konštantná a mení sa podľa rýchlosti prúdenia okolo prekážky. V tomto prípade ide s výhodou použiť teóriu podobnosti, ktorá hovorí, že odtrhávajúce vírov sa pri podobných geometriách bude správať rovnako z hľadiska frekvencie a určujúcimi parametrami je rozmer prekážky a rýchlosť prúdenia. Tieto faktory dáva do súvislosti Strouhalovo číslo

$$St = \frac{f \cdot D}{v} \quad [-] \quad (4.31)$$

Kde f [Hz] je frekvencia odtrhávajúcich sa vírov, D [m] je charakteristický rozmer prekážky a v [m/s] je rýchlosť prúdenia. Strouhalovo číslo ostáva pri kruhovej geometrii prekážky rovnaké. Z toho vyplýva že pri zmene rýchlosti vetra bude iná aj frekvencia odtrhávania vírov a teda aj frekvencia zaťaženia telesa.

Kvôli premennej frekvencii zaťaženia je nutné na chvíľu opustiť odbor energetiky a vstúpiť do odboru dynamiky. Každá mechanická sústava s reálnym telesom a reálnym ukotvením telesa má svoje špecifikum a na periodické zaťaženie bude reagovať inak. Odozva systému na periodické zaťažovanie závisí na rozložení hmotnosti a tlmení v systéme. Charakteristika systému na periodické zaťažovanie sa nazýva frekvenčne-amplitúdová charakteristika.



Obr. 4.23 Frekvenčne-amplitúdová charakteristika systému, a porovnanie jednotlivých charakteristík pri rôznych hodnotách tlmenia v systéme [37]

Ako je vidieť z obrázku 4.23, vplyvom premennej rýchlosti vetra, teda premennej zaťažovacej uhlovej frekvencii (v obr. ω [rad/s]) je systém vybudení vždy s inou amplitúdou. Je dôležité vedieť, že tvar frekvenčne-amplitúdovej závisí len na vlastností systému a zaťaženie nemá na tvar daných kriviek žiadny vplyv.

Z obrázku 4.43 sa dá vyčítať jedna dôležitá hodnota a to hodnota vlastnej uhlovej frekvencie ω_0 [rad/s]. Vlastná frekvencie je charakteristická hodnota pre systém a je veľmi dôležitá z hľadiska dynamiky ju poznať. Ak sa frekvencia zaťaženia bude zhodovať s vlastnou frekvenciou, potom sa systém dostane do rezonancie a amplitúda kmitov enormne vzrastie. Pre vlastnú frekvenciu systému platí vzťah

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{M}} \quad [1/s] \quad (4.32)$$

Kde K [N/m] je zovšeobecnená tuhosť systému a M [kg] je zovšeobecnená hmotnosť systému, v prípadoch, kedy je systém zložitejší a obsahuje viacero prvkov ako prvkov tlmenia, prvkov tuhosti a samotných telies, vtedy je na určenie veličín K a M použiť špeciálny postup určenia. Vo väčšine prípadov je však značný problém určiť predovšetkým tuhosť systému, a preto je lepšie určiť už len samotnú vlastnú frekvenciu systému na základe meraní alebo numerického modelovania.

Samotná problematika Karmánových vírov, ich vzniku a zásaditostiam spolu s dynamikou tuhých telies je omnoho zložitejšia, nie je však nutné zachádzať do podrobností a teda si stačilo ukázať základy týchto problematik pre pochopenie fungovania veterných strojov pracujúcich na kmitajúcom princípe.

4.8.2 Energia kmitajúceho systému

Vo všeobecnosti sa dá povedať, že energia kmitania sa skladá z dvoch foriem a to z kinetickej energie a energie polohovej, ktoré sa medzi sebou počas kmitania premieňajú. Energia systému však zostáva rovnaká. Celková energia sa dá vyjadriť nasledujúcim spôsobom [38]

$$E_c = E_{k,max} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{max}^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \quad [J] \quad (4.33)$$

Kde ω [rad/s] je uhlová frekvencia a A [m] je amplitúda kmitania. Je vidieť, že energia kmitajúceho systému záleží najviac na frekvencii a amplitúde. Je teda vhodné, aby mal systém čo najväčšiu energiu, ak ju je potrebné neskôr zužitkovať. Preto je najlepšie, aby frekvencia zaťaženia, teda odtrhávania vírov bola čo najbližšie k rezonančnej frekvencii, vtedy bude mať systém enormne zvýšenú amplitúdu a teda aj najväčšiu energiu.

Energia systému celkovo však nehovorí nič o prenose výkonu zo strany prúdu vzduchu na zariadenie. Je však jasné, že ak energia kmitania je veľká tak sa musela odniekadiaľ zobrať, čiže pri veľkej energii systému bude aj prenos energie zrejme vyšší, pretože aj na rozkmitanie je potrebné väčšie množstvo energie.

Zdroj [36], ako predstaviteľ kmitajúceho zariadenia s porovnateľným výkonom ako veterná turbína však neuvádza vôbec účinnosť premeny energie z prúdu vzduchu na zariadenie. Tiež neuvádza, akým spôsobom k premene energie dochádza. Dá sa však predpokladať, že pre mechanizmus premeny energie platia podobné princípy ako z obr. 4.7. Vzduchu sa teda zariadením odoberá časť jeho kinetickej energie. Účinnosť zariadenia je daná tým, ako moc vzduch spomalí pri vyrovnaní tlakov ďalej za zariadením. Dalo by sa tiež povedať, že čím širšia bude prúdová trubica ovplyvneného vzduchu za zariadením, tak tým

nižšia bude rýchlosť pri vyrovnaní tlakov za zariadením. Ako je vidieť z obr. 4.21 tak prúdová trubica ovplyvneného vzduchu za zariadením je voči šírke zariadenia dost' značná. Dalo by sa tak predpokladať, že zariadenie môže dosahovať rozumnej účinnosti. Jedná sa však len o odhad, keďže tento proces je omnoho viac zložitejší ako samotná prúdová teória, ku ktorej bol proces premeny energie prirovnaný, záleží ako moc zaváži tvorba vírov na celkový proces premeny energie, pretože víri samotná prúdová teória nezohľadňuje a tie si so sebou môžu niesť energiu aj cez fakt, že prúdová trubica je široká a axiálna rýchlosť nízka a znižovať tak teoretickú účinnosť zariadenia, určenú pomocou prúdovej teórie.

Zdroj [36] však uvádza, že zariadenie vysoké 2,8 m (s pracovnou výškou cca 2 m), pracuje pri vetre o hodnotách 3-12 m/s a výkon zariadenia môže dosahovať hodnotu až 100 W. Po dosadení týchto hodnôt do vzorca 4.18 a odhade šírky kmitajúceho panelu na 0,25 m a nominálnej rýchlosti vetra 10 m/s môže účinnosť premeny energie dosahovať hodnotu

$$\eta = \frac{P}{P_w} = \frac{100}{\frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_0^3} = \frac{100}{\frac{1,215}{2} \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0,33 \text{ [-]}$$

Ako je vidieť, účinnosť zariadenia nie je úplne najhoršia, ale ani najlepšia, záleží však na odhade plochy zariadenia a nominálnej rýchlosti vetru, kedy zariadenia dosahuje výkon 100 W, presné čísla zdroj [36] neuvádza a teda sa jedná len o veľmi hrubý odhad. Zariadenie ale pre mestá nemusí mať veľkú účinnosť, záleží teda aj na iných vlastnostiach, ktoré má toto zariadenie a v nich má výhody, o tom ale až v ďalšej kapitole.

4.8.3 Časti kmitajúceho zariadenia

Kmitajúce zariadenie je značne odlišné od bežnej veternej turbíny. Síce existuje viacero typov kmitajúcich elektrických zdrojov, ale v práci sa zameriam len na ten, ktorý by svojou veľkosťou a výkonom mohol konkurovať tradičným veterným turbínám.

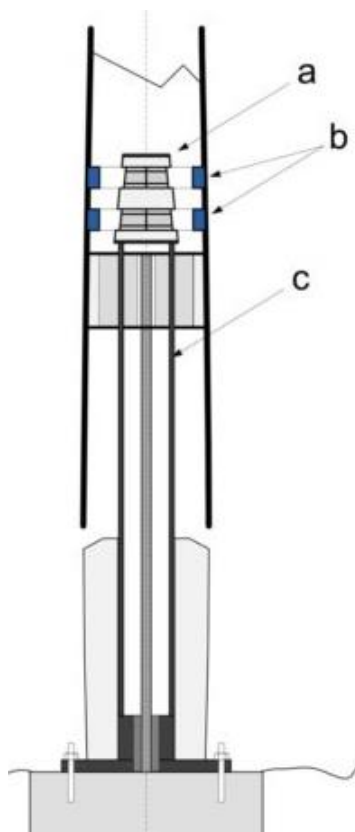
Zvonku tvorí kmitajúci stroj len valec rozdelený na dve časti. Jedna časť valca je pevne spojená so zemou, respektíve so základom. Druhá časť valca je pohyblivá. Väzba medzi dvoma časťami je taká aby umožňovala kmitanie v každom smere, jedná sa teda pravdepodobne o sférickú väzbu.



Obr. 4.24 Kmitajúce zariadenie zložené z dvoch cylindrických častí [36]

Všetko důležité sa však nachádza vo vnútri valcov, teda zariadenie na prenos energie a zariadenie na zrovnávanie frekvencií odtrhávania vírov s vlastnou frekvenciou systému. Zariadenie na prenos energie je veľmi jednoduché a jedná sa v podstate o sústavu magnetov a cievok usporiadaných tak, aby pri každom možnom smere kmitania bolo priblíženie cievka-magnet zaručené. [36] Magnety a cievky sú zrejme usporiadané po obvode stojaceho a kmitajúceho valca.

Zariadenie na zrovnávanie frekvencií už ale také elementárne nebude a zároveň je pravdepodobne tajomstvom firmy, pretože detailne vysvetlené nikde nie je. O zariadení ale píšú, že sa jedná znova o sústavu magnetov na stojacom a pohyblivom valci, ktoré pri rôznych frekvenciách budenia a teda aj iných amplitúdach menia svoju polohu voči sebe aby ovplyvňovali tuhosť systému (pri veľkých kmitoch sú magnety blízko pri sebe, pri malých sú od seba ďalej) a tak menili vlastnú frekvenciu zariadenia s cieľom dosiahnuť rezonanciu pri každej možnej rýchlosti vetra, teda každej možnej frekvencii budenia. [36] Takýmto spôsobom sa dokáže systém vždy automaticky synchronizovať bez použitia zložitej elektroniky.



Obr. 4. 25 Detailný pohľad na generátor kmitajúceho stroja [36] a- stojaca časť generátoru, b- pohybujúca sa časť generátoru, c- nepohyblivá časť kmitajúcej elektrárne

Ako je vidieť, jedná sa v podstate o veľmi jednoduché zariadenie. Je však ešte vo fáze testovania a vývoja, takže až čas ukáže, či toto jednoduché zariadenie nájde svoje miesto v rámci veternej energetiky.

4.8.4 Výhody kmitajícího zařízení

Týmto sa práca vracia ku kapitole 4.4 k podmienkam kladeným na veterný stroj pre mestské prostredia. Preto aj pre kmitajúce zariadenie je potrebné vyhodnotiť tieto podmienky s rovnakými pravidlami, aké boli uvedené v kapitole 4.4

Tab. 4.2 Vyhodnotenie podmienok kladených na veterné zariadenie

Typ zariadenia	Spoľahlivosť	Bezpečnosť	Plocha rotoru	Účinnosť	Otáčky	Jednoduchosť	Cena	Variabilita
Kmitajúce zariadenie	Nemá príliš veľa dielov ani prvkov na reguláciu, teda je spoľahlivý	Relatívne malá plocha vystavená vetru môže značiť, že je zariadenie bezpečné, tiež tu nič nerotuje vysokou rýchlosťou	Údajne kvôli nízkej účinnosti musí byť pre dodržanie predpísaného výkonu plocha väčšia oproti rotoru vrtulového typu	Nízka, údajne	Netočí sa	Jednoduché zariadenie, je však nutné ešte preskúmať, ako by zariadenie dodávalo energiu do siete alebo do batérií a či by nebola potrebná ďalšia elektronika	Nízka, porovnateľná s ostatnými typmi podľa zdroja [36]	Turbolencie- údajne by nemali príliš vadiť Smer-variabilný

Ako je vidieť z porovnania, kmitajúceho zariadenia podľa kladených požiadavkou dopadli relatívne dobre. Nad všetkými bodmi, keďže zariadenie ešte nie je úplne odskúšané visia veľké otázky. Zdroj [36] uvádza ako veľké výhody tohto zariadenia jeho životnosť, keďže neobsahuje veľa pohyblivých častí, a to len väzbu medzi valcami. Ďalšou výhodou zariadenia je to, že nepotrebuje žiadne brzdy, kmitanie vždy utlmí odvod energie do generátoru a pri veľmi vysokých rýchlostiach vetra, kedy by sa mohlo stať, že frekvencia bude príliš vysoká už jav odtrhávania podľa dôvodov uvedených v kapitole 4.8.1 ani nenastane. Vďaka svojmu vežovitému tvaru je možné tieto zariadenia postaviť veľmi blízko seba a ako výrobca uvádza narušenie prúdu predošlou vežou na ďalšie zariadenie takmer vôbec nevlplyva a práve preto sa hodí do mestských prostredí.

Je jasné, že výrobca daných zariadení uvádza samé výhody zariadenia, len čas však ukáže, či bude použitie kmitajúcich elektrární v mestách využívané.

4.9 Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 4.

- Existuje veľké množstvo typov veterných strojov, veľmi veľa z nich sa do tejto práce nedostalo, väčšina z nich však nemá v praxi uplatnenie pre ich zložitost' vzťahnutú na množstvo energie, ktoré vyprodukujú.
- Stroje využívajúce na svoj pohon odporovú zložku aerodynamickej sily môžu dosiahnuť účinnosť len okolo 20%. Stroje využívajúce na pohon vztlakovú zložku aerodynamickej sily môžu dosiahnuť teoreticky účinnosť 59%.
- Z Betzovej teórie plynú dôležité vzťahy pre výpočet veterného zariadenia ako napríklad rýchlosť v rovine rotoru a merná optimálna práca odvedená elementom rotoru.

- Výsledkom obtekania telesa médiom je sila, ktorá sa dá rozložiť do dvoch hlavných smerov a to smeru zhodným s prúdom (odpor) a do smeru kolmom na prúd (vztlak). Je však rozdiel v rozklade síl pri skúmaní aerodynamiky osamoteného profilu a pri skúmaní aerodynamiky profilu uloženého v lopatkovej mreži rotoru veternej turbíny.
- Podmienky kladené na malé veterné elektrárne pre sú odlišné od komerčných veterných turbín a z posúdenia vyšla najlepšie turbíny vrtuľového typu ako najvhodnejší kandidát do mestského prostredia predovšetkým kvôli svojej vysokej účinnosti a faktov z toho vyplývajúcich. Je tiež schopná pri vhodnom návrhu pracovať pri variabilných podmienkach, uvidí sa však až v kapitole 5., či je vôbec potrebná pre veternú turbínu v meste veľmi veľká variabilita vzhľadom na činnosť zariadenia pri širokej škále rýchlostí vetru.
- Konštrukcia malej veternej turbíny sa značne líši od konvenčných veterných turbín. Malá turbíny vrtuľového typu nepotrebuje prevodovku, mechanizmus na natáčanie listov vhodne do smeru vetru a iné elektrické vybavenie. Obsahuje však smerové vodítko, ktoré umožňuje natáčanie turbíny do smeru vetru.
- Zapojenie malej veternej turbíny by malo byť čo najjednoduchšie kvôli ekonomickému hľadisku. Najvhodnejšie zapojenie vyšlo zapojenie k sieti s tým, že generátor by mohol pracovať pri premenných otáčkach, je tak nutné použiť v zapojení frekvenčný menič ako aj iné elektrické zariadenia, ktoré takéto zapojenie umožnia.
- Väčšina komerčne dostupných malých veterných zariadení je nevhodných pre umiestnenie do mestských prostredí na strechy budov, pretože sú navrhnuté na nezmyselnú rýchlosť vetra o hodnote okolo 12 m/s.
- Vo fázy vývoja sú aj veterné stroje pracujúce na princípe kmitania. Majú však nižšiu účinnosť, výrobcovia však o nich píšu ako o vhodných zariadeniach pre mestá z dôvodu ich nenáročnosti na údržbu či veľkú toleranciu voči premennosti a turbulenciám v prúde vzduchu.

5 Návrh veterného stroja

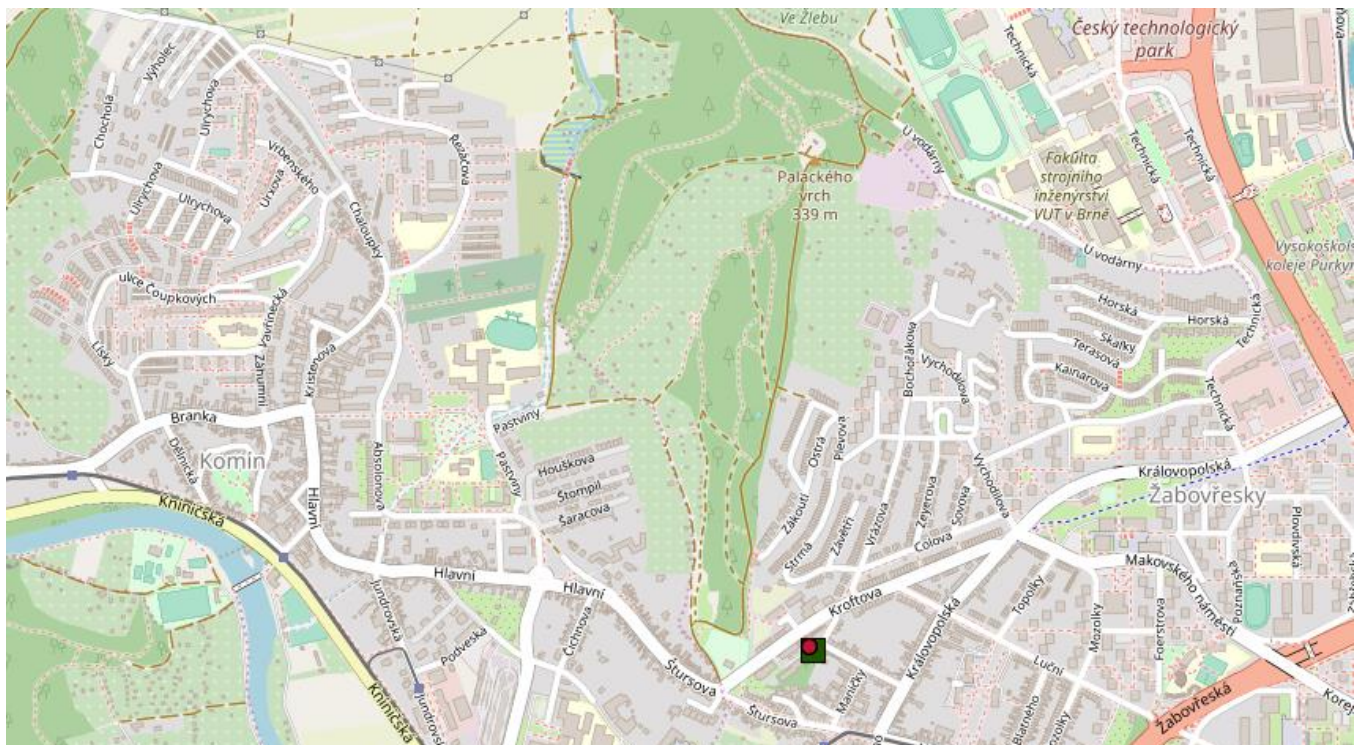
5.1 Výber lokality pre veterný stroj

Keďže sa práca zaoberá veternými strojmi pre mestské (obývané) oblasti tak pre prácu boli vybraté dve meteorologické meracie stanice v dôverne známom prostredí Brna. V Brne sa nachádzajú celkovo tri stanice Českého hydrometeorologického ústavu ďalej len ako ČHMU. Jedna je v sídlisku Žabovresky, druhá na kraji Brna v obci Troubsko a posledná je na letisku Brno-Tuřany. Stanica Brno-Tuřany pre získanie dát pre túto prácu nie je vhodná, pretože sa nachádza v relatívne otvorenej krajine bez výraznej zástavby.

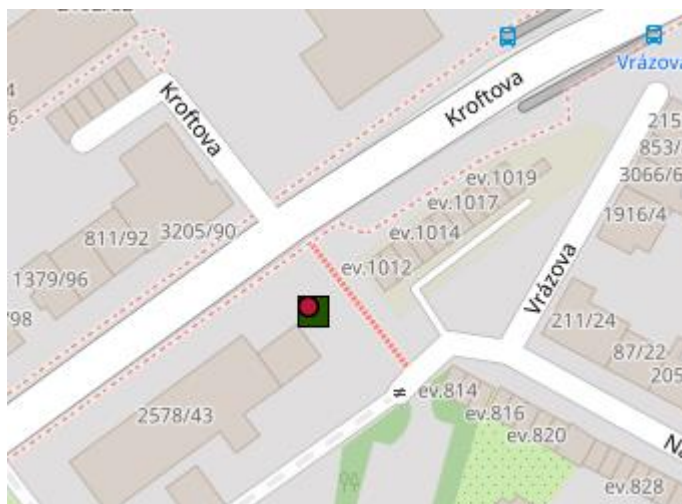
Stanica Žabovresky naopak predstavuje pre prácu dáta zo silno zastavanej sídliskovej oblasti, kde je navyše prúdenie vzduchu ovplyvnené Žabovreskou kotlinou a polohou stanice na svahu Palácekeho vrchu. Táto stanica teda predstavuje pre veterný stroj polohu, ktorá je neideálna, ale bude zaujímavé sledovať, ako veľmi tu fúka a či sa vôbec oplatí pre túto lokalitu navrhovať a umiestňovať veterný stroj. Rýchlosť vetra sa tu meria vo výške nad 10 metrov nad povrchom (stanica je umiestnená na streche budovy pobočky ČHMU).

Stanica Troubsko naopak predstavuje lokalitu, ktorá je na kraji mesta a krajina je tu menej ovplyvnená zástavbou a kopcami. Je to teda ideálnejšie miesto na umiestnenie veterného stroja. Prúdenie však tiež ovplyvňuje zástavba, blízke stromy a hlavne protihluková stena z príľahlej diaľnice. Rýchlosť vetra sa tu meria vo výške 10 metrov nad povrchom.

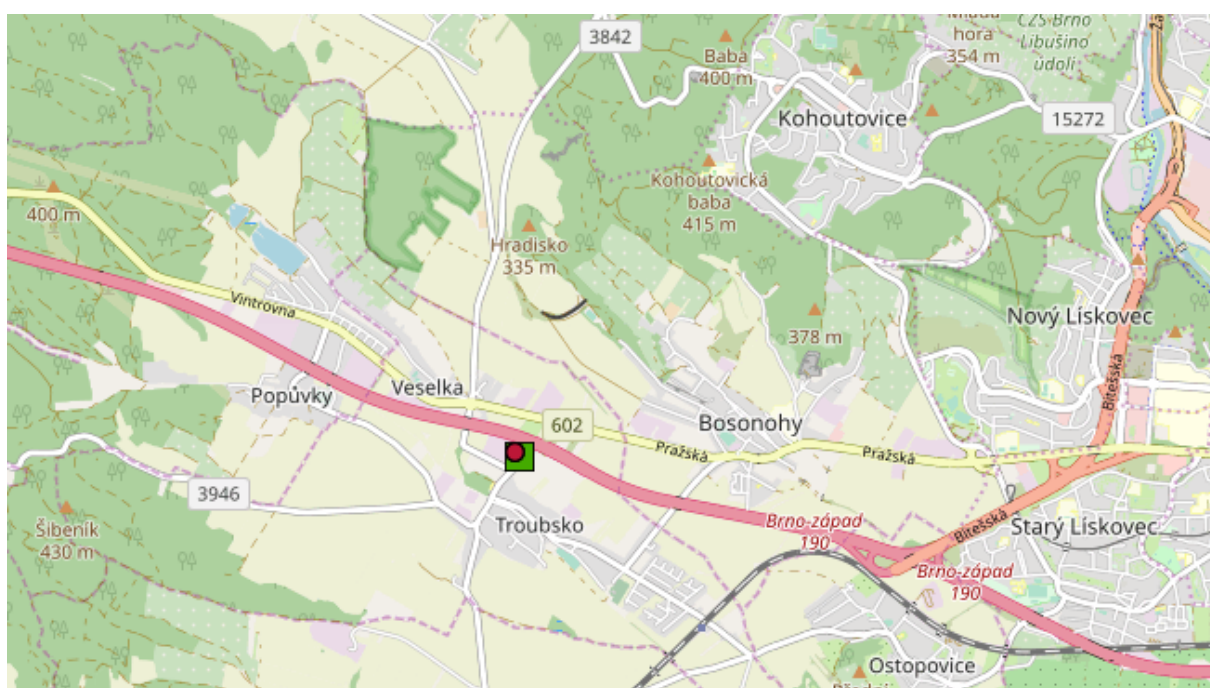
Hustota vzduchu pre uvažované lokality a pre výpočty bude uvažovaná pre priemernú teplotu v Brne a to 9°C a nadmorskú výšku 237 metrov nad morom a je podľa portálu TZB info [11] rovná $\rho = 1,215 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$.



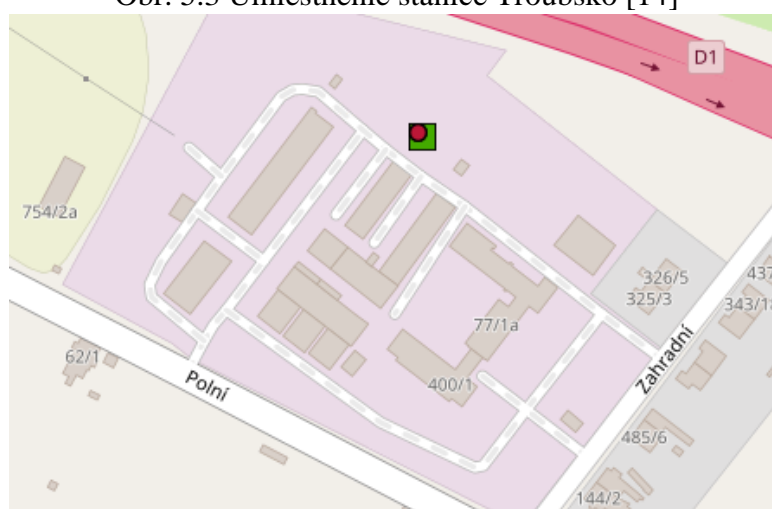
Obr. 5.1 Umiestnenie stanice ČHMU Brno-Žabovresky [14]



Obr. 5.2 Detail umiestnenia stanice na budove pobočky ČHMU [14]



Obr. 5.3 Umístění stanice Troubsko [14]



Obr. 5.4 Detail umiestnenia stanice ČHMU Troubsko [14]

5.1.1 „Bežný deň“ na stanicích

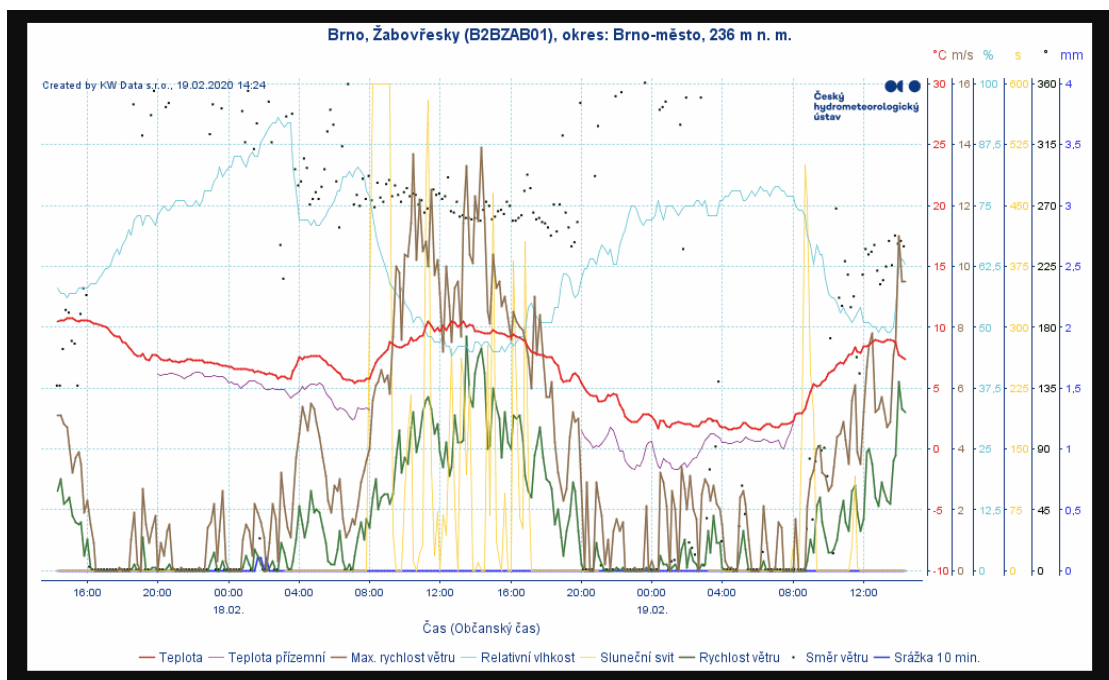
Čo sa myslí pod pojmom bežný deň, je časový priebeh rýchlostí vzduchu na danej stanici za jeden deň. ČHMU tieto údaje poskytuje na svojich stránkach a v každom okamihu sa dá pozrieť, ako vyzerá veterná situácia na stanici. Údaje sa poskytujú retrospektívne až na dva dni a sú dostupné zo zdroja [14].

Bežný deň, podľa údajov mne poskytnutých pre spomínané stanice je deň, kedy sa rýchlosť vetra pohybuje od 2 m/s po 4 m/s pretože tieto hodnoty sú v štatistickom súbore (denné hodnoty počas jedného kalendárneho roka), ktorý bude spracovaný v nasledujúcej kapitole najzastúpenejšie. Ako bolo vysvetlené v kapitole 2.2 vznik vetra, vietor vzniká pri slnečnom žiarení a pri rozličných teplotách povrchov. Prúdenie vzduchu pri spomínaných stanicích sa dá popísať ako miestny cirkulačný systém, kedy vietor vzniká len počas fázy dňa, kedy svieti slnko. Cez noc vietor utícha. A taká je aj realita pri bežnom dni, kedy sa vietor rozpohybuje zhruba o deviatej hodine ráno, a utícha okolo ôsmej hodiny večer.

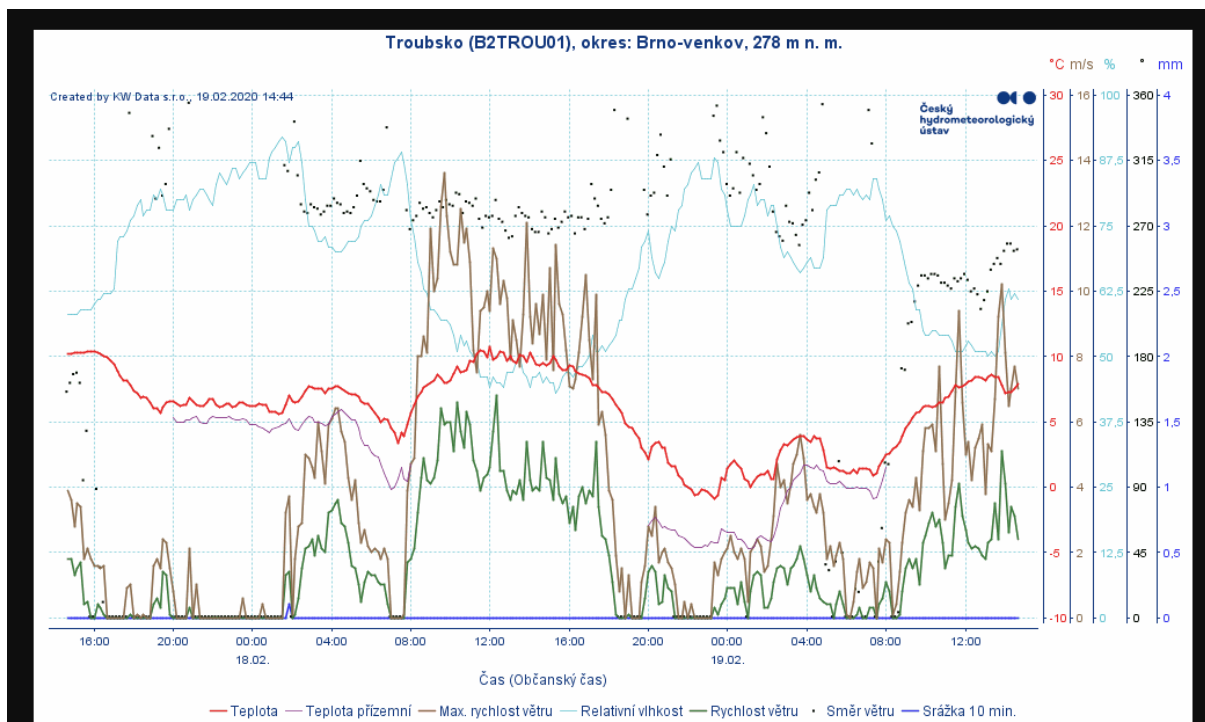
Takýmto dňom bol napríklad aj deň 18.2.2020, kedy bolo jasno a stanica Žabovresky zaznamenala slnečný svit v čase zhruba 9:00 až 17:00 (žltá krivka na obrázku 5.5 nižšie). Spolu so slnečným svitom sa zároveň aj dvíha vietor, zo svojej nulovej hodnoty, ktorú mal v noci na hodnotu zhruba 4 m/s okolo ktorej rýchlosť kolíše. Podobný priebeh má aj stanica Troubsko. Je nutné podotknúť, že tento deň bol pre veterné podmienky mimoriadne dobrý a rýchlosť vetra sa vyšplhala nad svoje priemerné hodnoty.

Samozrejme, že rýchlosť vetra nie je ovplyvnená len lokálnymi podmienkami ale aj prechodom mohutnejších tlakových výší a níží vznikajúcich nad Atlantickým oceánom. Vtedy môže fúkať aj v noci a nad ráno, prípadne rýchlosť vetra cez deň dosiahne vyšších hodnôt.

V realite je ale rýchlosť vzduchu a teda aj prúdenie ovplyvnené miestnymi cirkulačnými systémami ako aj prechodom väčších vzduchových celkov. A je len na konkrétnych podmienkach v danom dni, ako sa tieto prúdenia spoja a vytvoria tak denný priebeh rýchlostí vzduchu. Takto teda dostávame rozptýl hodnôt rýchlostí vzduchu.



Obr. 5.5 Priebeh nameraných veličín zo stanice Brno-Žabovresky. Žltá- slnečný svit, zelená- rýchlosť vetra [14]



Obr. 5.6 Priebeh nameraných veličín zo stanice Troubsko. Zelená- rýchlosť vetra [14]

Ako je podľa obrázkov 5.5 a 5.6 vidieť, rýchlosť vetra má istý periodický charakter. Pokiaľ sa nejedná o výnimočnú situáciu, v noci vietor utícha a cez deň vystúpi na istú hodnotu a okolo nej osciluje. Otázkou ale je, aký typ rýchlosti použiť ako návrhový pre veterný stroj. Áno, návrhová rýchlosť bude vychádzať zo štatistického súboru a podľa početnosti a obsiahnutého výkonu bude určená najvýhodnejšia hodnota. Ide však o to, z čoho sa bude skladať štatistický súbor.

Veterný stroj bude fungovať keď bude fúkať, preto nie je dobré pri návrhu vychádzať z priemernej dennej rýchlosti, pretože priemerná rýchlosť obsahuje aj hodnoty, kedy nefúka, teda v noci. Priemerná rýchlosť je nižšia ako hodnoty rýchlosti cez deň, kedy fúka a stroj by bol zbytočne navrhnutý na kúsok nižšiu rýchlosť vetra v porovnaní s reálnou rýchlosťou, kedy sa vzduch pohybuje, z čoho by mohli zbytočne vzniknúť na zariadení straty. Preto sa javí ako vhodné, vybrať si jeden čas, v priebehu dňa, kedy je už rýchlosť ustálená na istej hodnote a len okolo nej osciluje. Zariadenie teda bude spracovávať reálnu rýchlosť vzduchu, ktorá je zaťažená len chybou oscilácie rýchlosti okolo istej ustálenej hodnoty. Je však už na rozptyle štatistického súboru a jeho veľkosti, aby sa chyba oscilácie čo najmenej prejavila a návrhová rýchlosť pre zariadenie bola čo najvyššia a najreálnejšia pri daných dobrých veterných podmienkach. Tento čas som si zvolil ako 13:00 hod.

5.1.2 Spracovanie získaných dát

Od ČHMU boli po úvahách a zváženiach uvedených na konci predošlej kapitoly získané okamžité rýchlosti vetra v hodine 13:00 namerané na staniách Brno-Žabovresky a Troubsko. Rozsah meraní bol celý kalendárny rok 2019, teda vo výsledku súbor pre jednu stanicu obsahuje 365 dát.

Takýto typ dát je prístupný pre každého občana, stačí si o ne požiadať na najbližšej pobočke ČHMU. Pri splnení zmluvných podmienok (nešírenie dát) a zaplatení manipulačného poplatku (500 Kč nekomerčné využitie, 5000 Kč komerčné využitie) sú dáta sprístupnené.

Istý prehľad aj o iných lokalitách a na širšom území Českej Republiky podávajú zdroje [20] a [21], ktoré pojednávajú o priemernej rýchlosti vetra vo výške 10 metrov nad povrchom, teda vo výške, ktorá je vhodná na umiestnenie malého veterného stroja. Tieto zdroje udávajú priemernú hodnotu rýchlosti vetra 3-3,5 m/s, čo je často menej, ako uvádzajú získané dáta od ČHMU (kde je rýchlosť často aj nad 3,5 m/s), je to spôsobené tým, že hodnota rýchlosti je priemerná a teda zahŕňa aj obdobia bezvetria. Ako bude ukázané, návrhová a ekonomická rýchlosť vetra pre veterné zariadenie bude o kúsok vyššia ako priemerná rýchlosť pre danú lokalitu podľa veternej mapy, teda priemerná rýchlosť sa vôbec nehodí pre výpočet veterného zariadenia, dáva však istú predstavu o vhodnosti umiestnenia zariadenia v danej lokalite.

Pre veľký rozsah štatistického súboru je vhodné na začiatku si ho roztriediť. Triedenie sa musí riadiť istými pravidlami aby bolo prehľadné a každý prvok štatistického súboru bolo možné priradiť práve do jednej triedy. Triedenie vyzerá napríklad takto: $I_1 = \langle v_1, v_2 \rangle, I_2 = \langle v_2, v_3 \rangle, \dots, I_n = \langle v_{n-1}, v_n \rangle$. [15] Veličiny uvedené v nasledujúcich vzorcoch sú dvojité a to pre stanicu Žabovresky (index 1) a Troubsko (index 2).

Rozsah súboru:

$$n_1 = 365 \quad [-] \quad (5.1)$$

$$n_2 = 365 \quad [-] \quad (5.2)$$

Variačný obor:

$$x_1 = \langle 0,1; 8,5 \rangle \quad (5.3)$$

$$x_2 = \langle 0; 7,6 \rangle \quad (5.4)$$

Aby nebol počet tried príliš malý, alebo príliš veľký, je na počet tried použité Sturgesové pravidlo: [15]

$$m_1 = 1 + 3,3 \cdot \log n_1 = 1 + 3,3 \cdot \log(365) = 9,455 \quad [-] \quad (5.5)$$

$$m_2 = 1 + 3,3 \cdot \log n_2 = 1 + 3,3 \cdot \log(365) = 9,455 \quad [-] \quad (5.6)$$

Po zaokrúhlení volím:

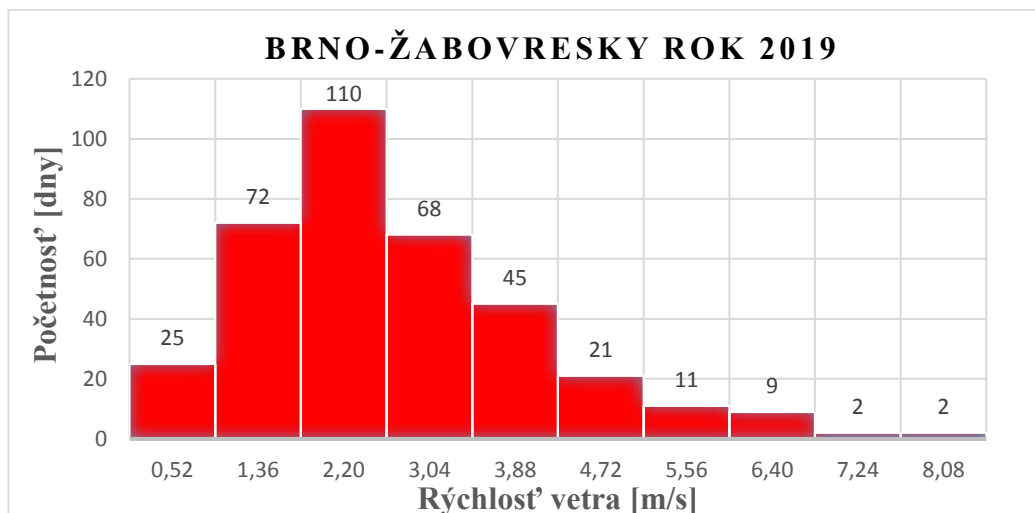
$$m_{1,2} = 10 \quad [-] \quad (5.7)$$

Dĺžka jednej triedy je potom:

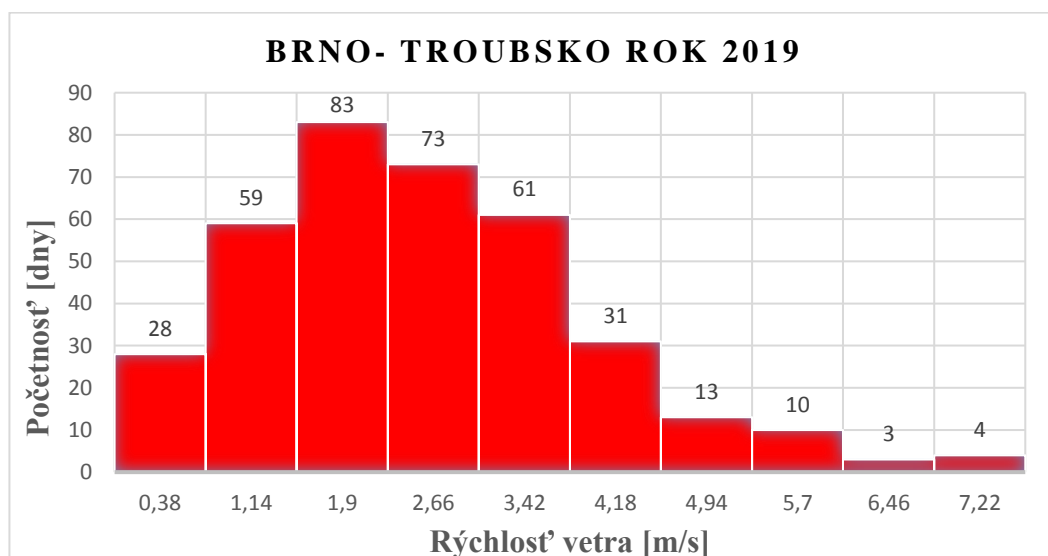
$$h_{tr,1} = \frac{x_{1n} - x_{11}}{m_1} = \frac{8,5 - 0,1}{10} = 0,84 \quad [-] \quad (5.8)$$

$$h_{tr,2} = \frac{x_{2n} - x_{21}}{m_2} = \frac{7,6 - 0}{10} = 0,76 \quad [-] \quad (5.9)$$

Početnosť rýchlostí potom vyzerá po roztriedení nasledovne na nasledujúcich obrázkoch.



Obr. 5.7 Histogram absolútnej počtetnosti rýchlostí vetra pre lokalitu Žabovresky [autor]



Obr. 5.8 Histogram absolútnej počtetnosti rýchlostí vetra pre lokalitu Troubsko [autor]

5.1.3 Weibullove rozdelenie

Pre zovšeobecnenie a popis rozloženia počtetností rýchlostí vetra sa pri veternej energetike používa Weibullové rozdelenie. Zovšeobecnením sa myslí takzvaná distribučná funkcia, ktorá spojite informuje o rozložení počtetnosti rýchlostí vetru. [6] Viac o tejto štatistickej funkcii je napísané aj v kapitole 2.5.2. Pomocou distribučnej funkcie sa dá získať prehľad o hustote energie pre danú zvolenú lokalitu a dá sa pomocou nej tiež určiť najekonomickjšia, teda návrhová rýchlosť pre veterné zariadenie. Dosadením rýchlosti do funkcie Weibullového rozdelenia dostaneme bezrozmerné číslo, v našom prípade počet dní, kedy bola rýchlosť vetra o danej hodnote, z toho vyplýva, že výsledok Weibullovej funkcie môžeme považovať ako istý časový údaj.

Distribučná funkcia Weibulloveho rozdelenia je daná vzt'ahom: [16] [17]

$$f(v) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{a}\right)^b\right] \quad [-] \quad (5.10)$$

Kde v je rychlost větra a čísla a , b sú parametre Weibullového rozdelenia. O týchto parametroch a o ich vplyve na rozdelenie je tiež viac napísané v kapitole 2.5.2.

Nasledujúce vzorce parametrov a , b sú prevzaté zo zdrojov [16] [17] ako aj ich odhady a doporučená. Dajú sa vypočítať rôznymi metódami, ale ako vyššie uvedené zdroje napovedajú najvhodnejšia je metóda maximálnej pravdepodobnosti. Tvarový súčiniteľ b je daný nasledujúcim vzťahom:

$$b_{j+1} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^{b_j} \cdot \ln(v_{w,i})}{\sum_{i=1}^n v_i^{b_j}} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad [-] \quad (5.11)$$

Ako je vidieť, výpočet parametru b vedie na iteračný výpočet. V zdrojoch [16] [17] sa uvádza, že parameter b sa pohybuje v hodnotách od 1,5 do 3. Preto na začiatok, aby sa iteračný výpočet pohol, volím počiatočnú hodnotu parametru b ako 2.

Parameter mriežky a je daný vzťahom:

$$a = \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^b \right]^{\frac{1}{b}} \quad [-] \quad (5.12)$$

Po iteráciách sme dostali hodnoty súčiniteľov pre jednotlivé lokality (hodnota parametru b bola vypočítaná s presnosťou na osem desatinných miest).

$$b_1 = 1,936 \quad [-] \quad (5.13)$$

$$a_1 = 3,044 \quad [-] \quad (5.14)$$

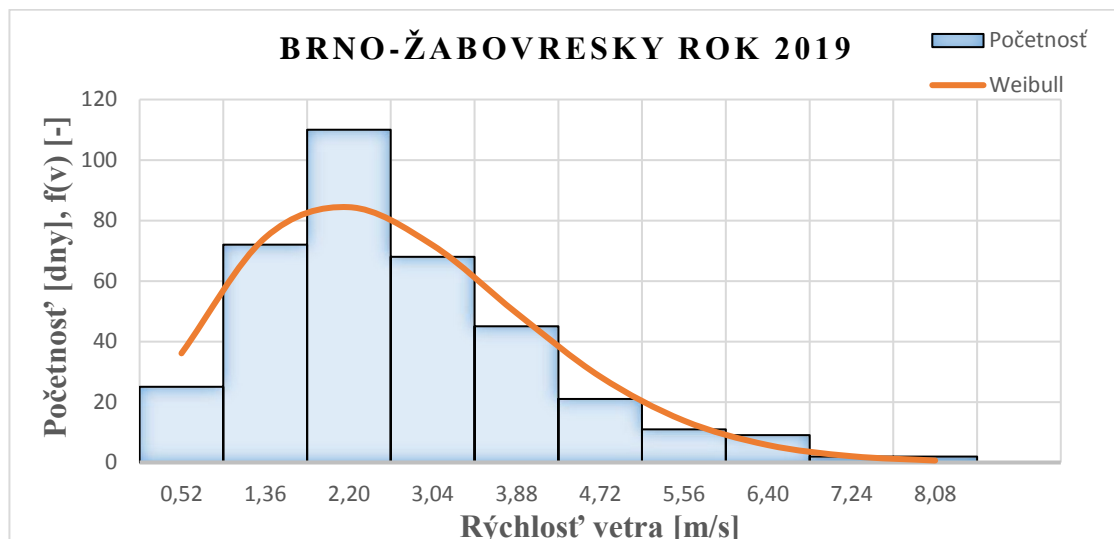
$$b_2 = 1,937 \quad [-] \quad (5.15)$$

$$a_2 = 2,909 \quad [-] \quad (5.16)$$

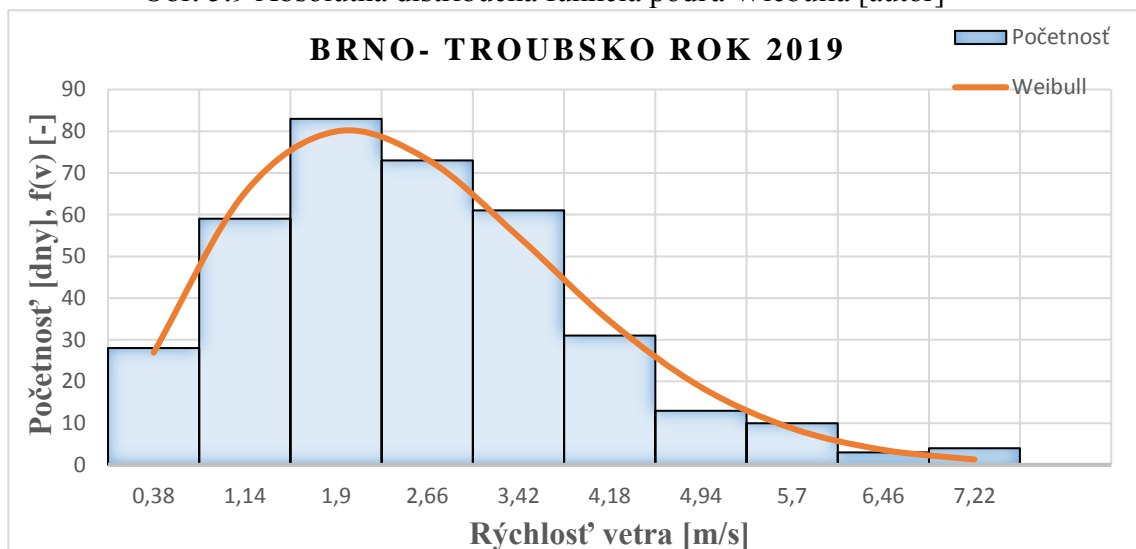
Weibullova funkcia potom vyzerá napríklad pre lokalitu Žabovresky nasledovne:

$$f(v) = \frac{1,936}{3,044} \cdot \left(\frac{v}{3,044}\right)^{1,936-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{3,044}\right)^{1,936}\right] \quad [-] \quad (5.17)$$

Takto získaná funkcia sa tiež nazýva ako relatívna distribučná funkcia a dosadením rýchlosti do funkcie sa získa len relatívny údaj vzhľadom na celkový počet meraní. Aby sa distribučná funkcia mohla porovnávať s histogramom musí sa celá funkcia prenásobiť počtom meraní a dĺžkou triedy, potom získame takzvanú absolútnu distribučnú funkciu, kedy po dosadení rýchlostí do funkcie sa získa reálny počet dní, kedy sa dá očakávať výskyt danej rýchlosti. [16]



Obr. 5.9 Absolútna distribučná funkcia podľa Weibulla [autor]

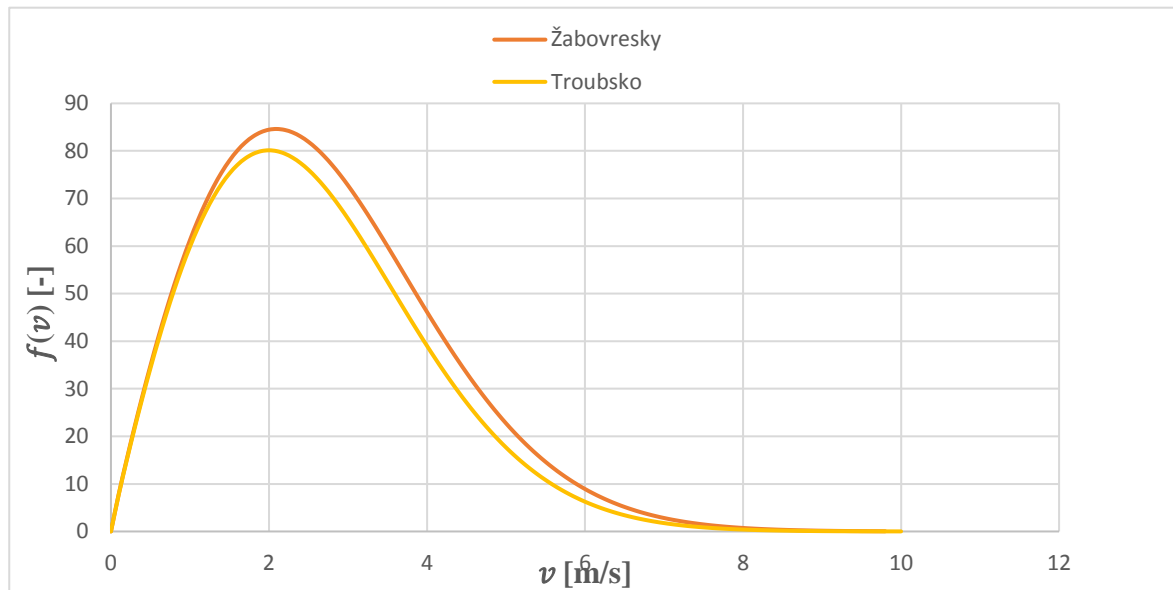


Obr. 5.10 Porovnanie absolútnej početnosti rýchlostí vetra s distribučnou funkciou podľa Weibulla [autor]

5.1.4 Závěry vyplývající ze spracovania dát

Znázornené distribučné funkcie v obrázkoch 5.9 a 5.10 v porovnaní s histogramami absolútnej početnosti nie sú od nich veľmi rozdielne a kopírujú priebeh početností v histograme, priebehy sa líšia len jemne, je to však dané náhradou touto funkciou, ktorá údaje zjednodušuje s cieľom vytvorenia spojitých závislostí.

Z obrázkov je tiež vidieť, že dané lokácie sú si veľmi podobné, čo sa Weibullových funkcií týka a líšia sa jemne iba v polohe maxima. Je to spôsobené tým, že obe lokácie sú výrazne ovplyvnené okolitou zástavbou a členitosťou terénu, čiže ako je uvedené v závere kapitoly 2.5.2 drsnosť povrchu ovplyvňuje hodnotu súčiniteľa b a keďže sú si lokality v tomto podobné majú podobný aj súčiniteľ b (čoho dôkazom je aj výpočet). Tiež lokácie neležia výrazne ďaleko od seba, čiže veterné podmienky sú pre obe lokácie zhruba podobné z hľadiska priemernej rýchlosti vetra, čo ovplyvňuje súčiniteľ a , ktorý pre obe lokácie vyšiel tiež podobný. Z tejto podobnosti teda koniec koncov vyplýva aj podobnosť samotných funkcií.



Obr. 5.11 Porovnanie Weibullových funkcií (absolútnych) pre obe lokality [autor]

Ako je z obrázku 5.11 viditeľné, lokalita Žabovresky má maximum funkcie posunuté k vyšším rýchlostiam, pretože dáta rýchlostí pre túto lokalitu sú namerané v kúsok vyššej výške ako 10 metrov, z čoho vyplýva priemerne kúsok vyššia rýchlosť vetra. Prúdenie je však ovplyvnené vyššími prekážkami a kopcom a tak nie je veľkou chybou prehlásiť o týchto dvoch lokalitách že sú si čo sa týka rýchlostí vetra a jeho rozložení (početnosti) veľmi podobné (keby boli dáta namerané v nižšej výške, teda 10 metrov, maximum funkcie by sa posunulo doľava a je možné, že by si boli lokality ešte podobnejšie).

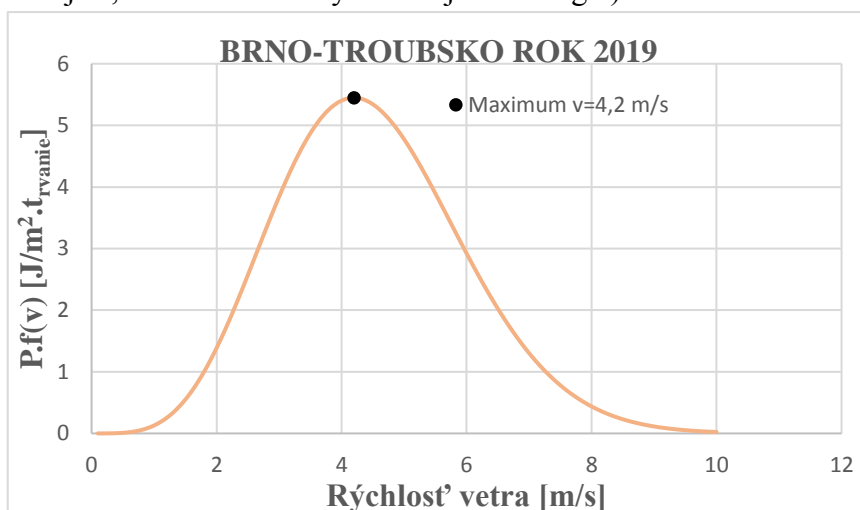
Záverom by sa dalo povedať, že rozdiel medzi oboma lokáciami vôbec nie je výrazný a dalo by sa usudzovať, že nie je veľký rozdiel medzi poveternostnými podmienkami medzi krajom mesta a obývanou štvrťou hlbšie v meste. Čo prúdenie ovplyvňuje je akákoľvek prekážka a pre umiestnenie veterného stroja je zhruba jedno, či sa nachádza za prvou prekážkou, alebo za radom prekážok, rýchlosť prúdenia za prekážkou (voči voľnému prúdu pred prekážkami) sa už s pribúdajúcimi prekážkami výrazne nezmení a tak je jedno, či je stroj umiestnený na kraji alebo hlbšie v meste. Je však nutné podotknúť, že tvrdenie platí, pokiaľ sa výška prekážok výrazne nemení (čo platí pre obe lokality, keďže v ich okolí sú len nižšie budovy a stromy). Veľkú zmenu prúdenia, teda jeho spomalenie dokáže dosiahnuť výrazne vyššia prekážka voči ostatným, vtedy by sa už líšil z pohľadu rýchlostí vetra kraj a stred mesta (kde sú vyššie budovy).

5.1.5 Určenie návrhovej rýchlosti vetra pre veterný stroj

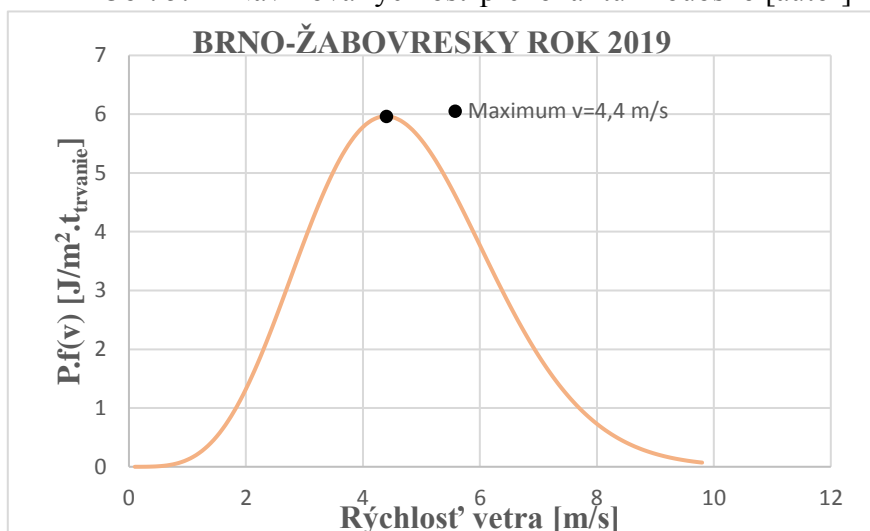
Návrhová rýchlosť vetra je akýmsi vstupom do výpočtu veterného stroja. Podľa tejto rýchlosti sa budú voliť isté parametre a navrhovať sa na ňu lopatky, prípadne tvar rotoru. Určenie tejto rýchlosti vychádza z úvahy, že stroj bude najužitočnejší, pokiaľ bude vyrábať, čo najväčšie množstvo energie. Ako bolo spomínané v kapitole 2.4, výkon vetra rastie s tretou mocninou rýchlosti vetra podľa vzťahu 2.11. Výkon samotný ale nemá výpovednú hodnotu, čo sa energie týka, je potrebné k nemu pridať čas, alebo dobu trvania aby sa z výkonu stala energia. Pre určenie tejto rýchlosti je nutné spolu sklbiť výkon vetru s dobou jeho pôsobenia tak, aby bol energetický výtťažok čo najväčší. Pre príklad, vysoké hodnoty rýchlosti vetra so sebou nesú vysoký výkon, ale ich výskyt je veľmi malý a tak energia zužitkovaná týmto pôsobením

je tiež malá, to isté ale naopak platí aj pre nízke rýchlosti, ktorých výkon je maličký, ale vyskytujú sa veľmi často, ich zužitkovaná energia bude tiež malá. Najlepšia hodnota návrhovej rýchlosti bude ležať pravdepodobne niekde medzi častým výskytom nízkych rýchlostí a zriedkavým výskytom vysokých rýchlostí. Čas respektíve početnosť výskytu rýchlostí vetra je známy z Weibullového rozdelenia.

Súčinom distribučnej funkcie (5.17) a rovnice výkonu (2.11) vznikne funkcia zohľadňujúca výkon vetra s početnosťou (dobou) jeho výskytu. Je jedno, či sa použije absolútna distribučná funkcia alebo relatívna, keďže absolútna početnosť je len vynásobená konštantou (početnosť meraní a dĺžka triedy rozdelenia) a na tvar a maximum z kriviek 5.12 a 5.13 nemá vplyv. Táto krivka, keďže je súčinom výkonu a početnosti, ešte nehovorí o energii, ktorú je možné za sledované obdobie pretransformovať pri danej rýchlosti vetra, ale dáva do súvislosti výkon s jeho výskytom. Pre hodnotu energie by bolo potrebné funkciu ešte prenásobiť dĺžkou trvania veterného dňa, ale opäť, to na tvar kriviek nemá vplyv pretože by sa jednalo o konštantu. Hodnota v maxime tejto krivky, bude braná ako návrhová rýchlosť, keďže vzhľadom na jej výskyt je pri nej možné poskytovať najvyšší výkon (tento výkon bude vyvážaný najčastejšie, teda sa z neho vytvorí najviac energie).



Obr. 5.12 Návrhová rýchlosť pre lokalitu Troubsko [autor]



Obr. 5.13 Návrhová rýchlosť pre lokalitu Žabovresky [autor]

Ako už bolo povedané, lokality sú podobné, teda aj návrhová rýchlosť vyšla veľmi podobne. Pre lokalitu Žabovresky vyšla rýchlosť trochu vyššia čo priamo súvisí s rozdelením početnosti rýchlostí, keďže táto lokalita má maximum Weibullovej funkcie posunutú k vyšším rýchlostiam.

Návrhovú rýchlosť pre výpočet ale budem uvažovať z lokality Žabovresky, ktorá má kúsok väčšiu výpovednú hodnotu vzhľadom na návrh veterného stroja pre mestské prostredia, z dôvodu umiestnenia meracej stanice viac v hĺbke mesta. Preto dôležitá a počítateľná hodnota pre výpočet je

$$v_w = 4,4 [m/s]$$

5.2 Výpočet veterného stroja

Existuje viacero prístupov ako spočítať veterný stroj, záležiacich na druhu veterného stroja. Z dôvodov uvedených v kap. 4 sa javia najideálnejšie pre mestské prostredia stroje typu Savonius alebo stroje vrtuľového typu, pre tento typ rotu bude uvažovaný výpočet.

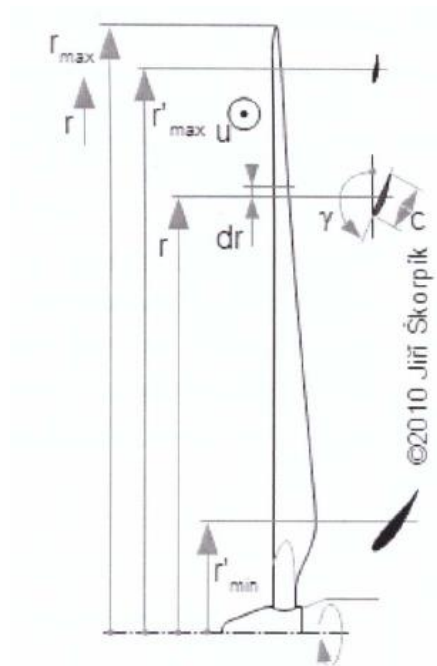
Pre rotory vrtuľového typu existuje viacero metód, podľa ktorých sa dá spočítať ich geometria. Dve najzakladanejšie sú teória lopatkovej mreže a metóda BEM. Teória lopatkovej mreže je o čosi jednoduchšia ako metóda BEM. Tieto metódy sa voči sebe líšia prístupom k výpočtu ako aj jeho komplexnosťou. Napríklad v teórii lopatkovej mreže sa uvažujú len profilové straty a v metóde BEM sa uvažujú aj straty rotáciou vzduchového poľa za rotorom. [25] Započítaním týchto strát sa potom geometria vrtule koriguje a v konečnom dôsledku vrtuľa vyzerá inak ako by to bolo v prípade metódy výpočtu podľa teórie lopatkovej mreže.

Pre špecifickosť tejto práce a z dôvodu charakteru prúdenia v mestskom prostredí som si vybral ako výpočtovú metódu teóriu lopatkovej mreže ďalej len ako TLM. Krútiace vzduchové pole za rotorom ma v tomto prípade až tak nezaujímá, pretože v mestskom prostredí budú na vrtuľovom stroji vznikať straty úplne iného charakteru, ktoré budú azda aj dominantnejšie. Ide najmä o to, že prúdenie okolo budov je trojrozmerné a vrtuľa tak nebude vždy spracovávať prúd, ktorý je vzhľadom na plochu jej rotoru kolmý. Tiež turbolencie vznikajúce v prostredí domov nebudú vplývať dobre na výkon a chod stroja. V neposlednom rade aj premennosť smeru vetra bude vytvárať isté straty, aj keď bude mať vrtuľa smerové vodítko, pretože vždy bude chvíľu trvať, kým sa vrtuľa do smeru vetra otočí. (trojrozmerný charakter prúdenia, turbolencie a náhle zmeny smeru nezahŕňajú namerané hodnoty z ktorých sa vychádza)

Vrtuľa vypočítaná podľa TLM nebude až taká precízna, ako by to bolo v prípade metódy BEM, avšak na danej rozlišovacej úrovni je tento výpočet dostačujúci.

5.2.1 Teória lopatkovej mreže

Táto metóda vychádza z predstavy, že lopatky sú usporiadané v mreži ako je to napríklad v parných turbínach a vytvárajú tak prietokový kanál. Z tejto teórie vychádzajú vzťahy pre výpočet geometrie lopatiek. V prípade veterných turbín je ale rozteč medzi lopatkami natoľko veľká, že sa ako doplnok k teórii lopatkovej mreže môže použiť aj teória osamoteného profilu. [23] Skĺbením týchto dvoch teórií vzniknú výsledné vzťahy pre výpočet geometrie lopatiek. Lopatka sa v tomto prípade pomyselne rozreže na N elementov a dopočítava sa dĺžka tetivy uhol nastavenia v mreži, pričom jednotlivé elementy sa medzi sebou neovplyvňujú.



Obr. 5.14 Lopatka veternej turbíny spolu aj s rezmi, kde vidieť odlišné nastavenie lopatky v mreži γ [°] a dĺžku tetivy c [m] vzhľadom na polomer. Vidieť tiež, že funkčná časť lopatky začína až na polomere r_{\min} [m] (kvôli uchyteniu lopatky na náboj rotoru) a končí na polomere r_{\max} (kvôli okrajovým stratám lopatky) [23]

Výpočtové vzťahy záležia tiež od voľby profilu, ktorý sa vyberá na základe jeho aerodynamických vlastností (určujú sa experimentálne). Vstupmi pre výpočet sú koeficient odporu a vztlaku, ktoré predovšetkým záležia na uhle nábehu a Reynoldsovom čísle.

$$Re = \frac{w \cdot c}{\vartheta} [-] \quad (5.18)$$

Kde c [m] je dĺžka tetivy, ϑ [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] je kinematická viskozita a w [m/s] je relatívna rýchlosť, v prípade obtekania profilu je to relatívna rýchlosť vzduchu vzhľadom na profil na danom polomere. Je jasné, že túto hodnotu je nutné na začiatku odhadnúť a neskôr skontrolovať.. Hodnota bola zvolená podľa literatúry na $Re=200\,000$. Reynoldsovo číslo tiež charakterizuje, či je prúdenie laminárne alebo turbolentné a dáva do pomeru zotrvačné sily so silami viskóznymi. Zdroj [23] uvádza, že vplyv hodnoty Reynoldsova čísla na presnosť výpočtu nie je zásadný.

Výpočet podľa tejto metódy začína v odhade účinnosti stroja, označuje sa ako c_p a nazýva sa tiež výkonový koeficient. Podľa neho sa dá spočítať priemer rotora. Ďalej sa postupuje vo výpočte geometrie rotora čoho výsledkom je nová hodnota výkonového koeficientu, z čoho sa rotor aj geometria lopatiek znova prepočítajú a dostane sa tak finálny tvar rotora so všetkými geometrickými špecifikáciami. Pri tejto metóde je však dôležité si uvedomiť, čo je mechanický a elektrický výkon. Mechanický výkon je zahrnutý vo výkonovom koeficiente. Elektrickú účinnosť generátoru je však nutné uvažovať samostatne, aby sa v konečnom dôsledku dostal výkon celého stroja (ak sa teda uvažuje využitie stroja na výrobu elektrickej energie).

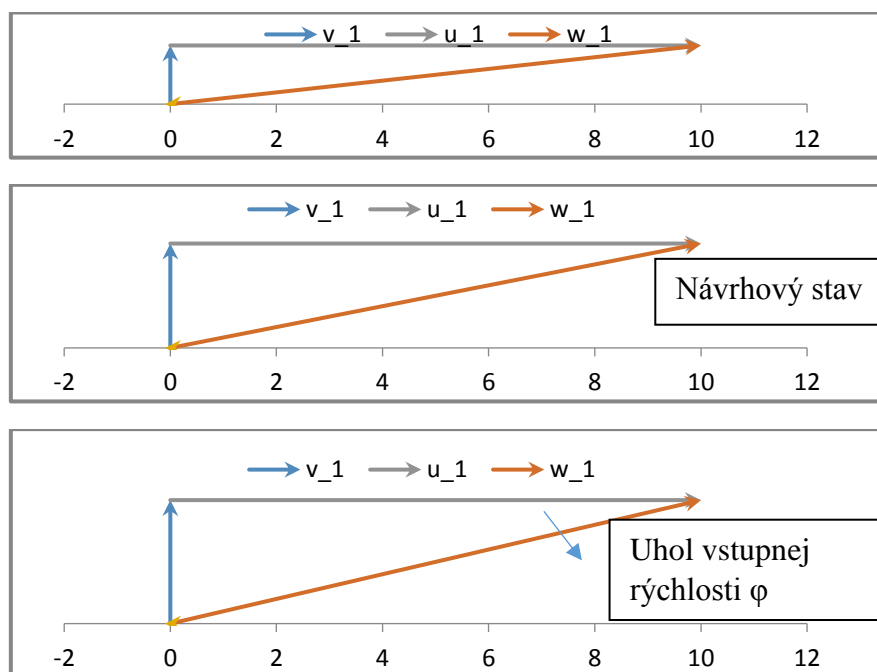
Postup výpočtu je uvedený v zdrojoch [22], [25] a na webe Ing. Jiřího Škorpíka Ph.D. [23]

5.2.2 Výber vhodného aerodynamického profilu

Ako už bolo spomenuté v kapitole 4, vrtuľový rotor pracuje na princípe vztlaku, z toho vyplýva, že hľadaný profil musí mať čo najväčší koeficient vztlaku pri čo najmenšom koeficiente odporu. Voľba profilu ale záleží aj na pevnostnom hľadisku, pretože list vrtule je namáhaný odstredivou silou a ohybom od axiálneho tlaku vzduchu. Preto v praxi, hlavne u koreňa lopatky dochádza k istému kompromisu a lopatka tu má nižšiu veľkosť ako by podľa výpočtu mala mať (kvôli uchyteniu na hriadeľ a pevnostnému hľadisku). Aerodynamické profily sú poväčšine tajomstvom firmy a ku konkrétnym a ideálnym profilom je ťažké sa dostať. Napriek tomu je možné sa zadarmo dostať ku veľkej databáze profilov v zdroji [24]. Popis aerodynamického profilu sa nachádza v kapitole 4. v časti venujúcej sa aerodynamike.

Profily pre veľké elektrárne sa líšia oproti profilom odporúčaným pre malé turbíny. V prípade veľkej turbíny sú profily precízne tvarované a majú vysoký súčiniteľ vztlaku presne v jednom bode, kedy je vzhl'adom na rýchlosť otáčania a rýchlosť vetra ideálny nábehový uhol, teda maximálna vztlaková sila. V prípade malej turbíny ale ide skôr o variabilitu, a preto je vhodné zvoliť profil, ktorý má vysoký pomer koeficientu vztlaku a koeficientu odporu pre širšie pásmo uhlov nábehu, tým sa kompenzuje premenlivosť rýchlosti vetra a vysoký vztlak bude na list vrtule pôsobiť aj v širšom pásme rýchlostí vetra. [6]

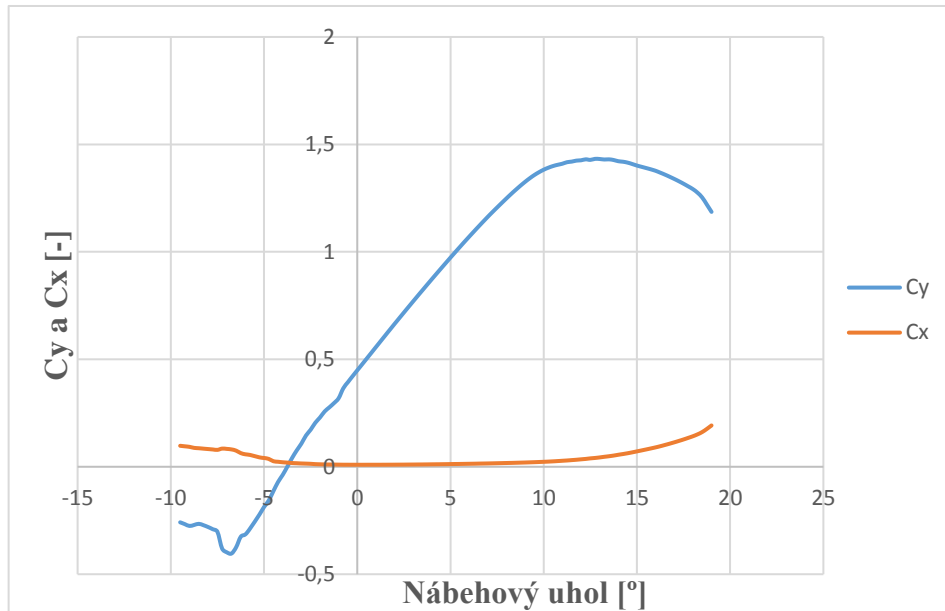
Pre ukážku sú ukázané na obrázku 5.15 vstupné rýchlostné trojuholníky pri konštantnej obvodovej rýchlosti a rozličnej vstupnej rýchlosti o veľkosti 2,2, 4,4 a 6,4 m/s, teda okolo návrhovej rýchlosti (4,4 m/s). Pričom platí vzťah $v_a = v_1 = \frac{2}{3} v_w$ [m/s].



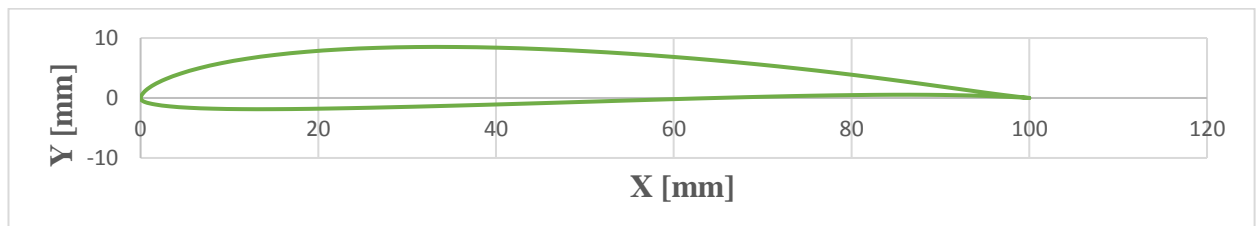
Obr. 5.15 Zmena tvaru vstupného rýchlostného trojuholníku pri zmene rýchlostí vetra okolo návrhovej rýchlosti pri konštantných otáčkach. Uhol vstupnej rýchlosti sa mení od návrhového (približne 16°) pri rýchlosti vetra $v_{w,2,2}=2,2$ m/s až o 8° a pri rýchlosti vetra $v_{w,6,4}=6,4$ m/s až o 7° . Tento rozptyl je síce dosť veľký a pravdepodobne by nemal na chod turbíny dobrý vplyv a vznikali by straty zlým uhlom nábehu ale dokazuje to ako dosť sa môže zmeniť chod turbíny aj pri relatívne malej zmene vstupnej rýchlosti. Preto je nutné vybrať čo najvariabilnejší profil. [autor]

Vzhľadom na vyššie uvedené požiadavky, režim prúdenia a otázku variability bol pre prácu zvolený profil SD7032-099-88. Zdroj uvádza namerané dáta pre hodnotu $Re=200\ 000$. [24]

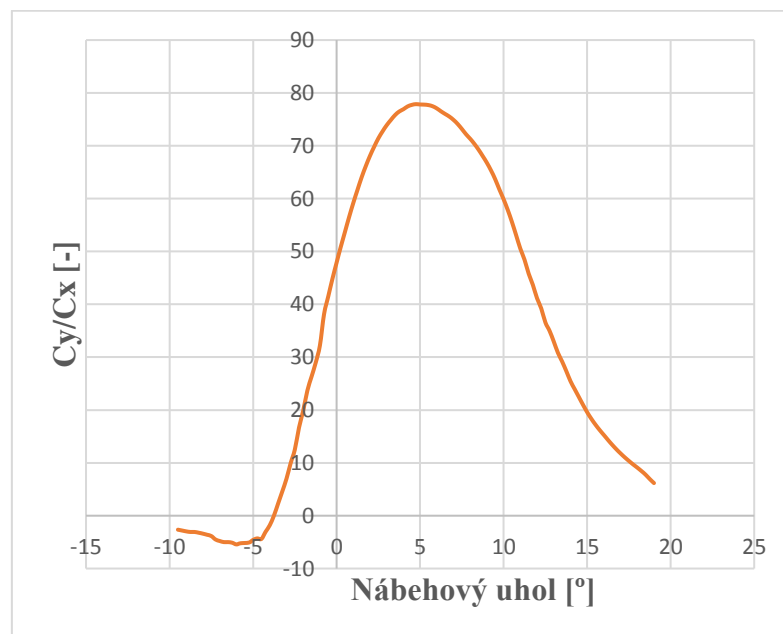
Dáta pre vybraný profil vyzerajú nasledovne.



Obr. 5.16 Priebeh závislosti koeficientov c_y a c_x na uhle nábehu [24]



Obr. 5.17 Tvar lopatky SD7032-099-88 pre dĺžku tetivy $c=100$ mm [24]



Obr. 5.18 Závislosť pomeru c_y/c_x na uhle nábehu pre profil SD7032-099-88 [24]

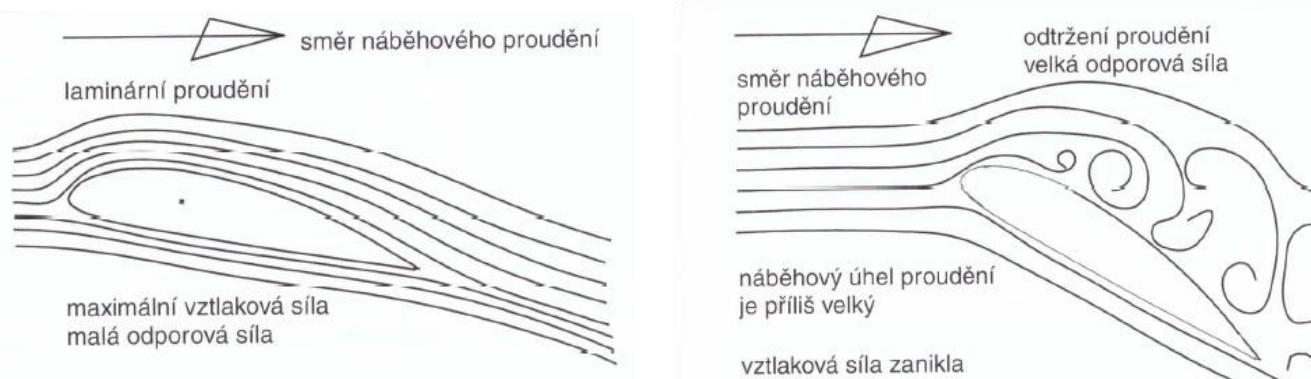
Čo je ale najdôležitejšie je pomer c_y/c_x vzhľadom na uhle nábehu. Maximum závislosti ukáže pri akom uhle nábehu je najvýraznejší vztlak voči odporu. Na závislosti 5.18 je tiež vidieť, že pri uhle $4,75^\circ$ sa nachádza maximum funkcie. Oproti iným profilom má zvolený profil veľmi pozvoľný nárast a klesanie tejto funkcie, to znamená, že maximálna vztlaková sila bude vytváraná v širokom zábere uhlov nábehu, teda pri rôznych rýchlostiach vetra. Zdroj [24] uvádza toto pásmo od 3° až 6° . Po tejto hodnote dochádza k poklesu vztlaku, je to spôsobené tým, že sa začína odtrhávať medzná vrstva pri vysokej rýchlosti vetra. Pre predstavu je uvedené v tabuľke 5.1 ako sa môže meniť rýchlosť vetra, tak aby bolo zachované ideálne pásmo uhlov nábehu pri konštantných otáčkach a istom nastavení lopatky vzhľadom na rovinu rotácie (všetky geometrické pomery sú ukázané v obr. 5.23, z neho vyplývajú vypočítané hodnoty v tab. 5.1).

Tab. 5.1 Rýchlosť vetra pripadajúca na rozsah ideálnych uhlov nábehu pre profil SD7032-099-88 a vypočítané hodnoty z kap. 5.2.10, vzťahy sú uvedené v kap. 5.2.8 [24]

Obvodová rýchlosť [m/s]	Uhol nastavenia lopatky [°]	Uhol nábehu [°]	Uhol relatívnej rýchlosti [°]	Rýchlosť v rovine rotácie [m/s]	Rýchlosť vetra [m/s]
10 (päta)	11,5	3	14,5	2,58	3,87
10	11,5	6	17,5	3,15	4,72
35 (špička)	0,037	3	3,037	1,85	2,78
35	0,037	6	6,037	3,70	5,55

Ako je vidieť z tabuľky 5.1, rýchlosť vetra aj pre veľmi variabilné vlastnosti lopatky nie je moc premenná, od návrhovej rýchlosti sa líši len veľmi málo a tiež táto variabilita závisí na polomere lopatky, na špiči je variabilita väčšia ako u päty. Je to však aj dobre, pretože sa musí brať ohľad aj na energetický prínos pri danej rýchlosti vetra. Napr. rýchlosť z obr. 5.15 $v_{w2,2}=2,2$ m/s nemá pri veternom zariadení takmer žiadny význam a tak nedáva zmysel mať variabilné vlastnosti až do takejto mieri. Ďalším faktorom je to, že v realite bude rýchlosť vetra v priebehu dňa kolísť okolo návrhovej rýchlosti, teda variabilita vlastností nahráva tomuto faktoru a veterný stroj bude pracovať dobre aj v týchto podmienkach.

Efektu odtrhnutia medznej vrstvy od profilu súvisiacim s poklesom vztlaku sa dá využiť ako aerodynamická brzda. Poklesom vztlaku prestáva na list pôsobiť sila a teda sa vrtuľa pri zvyšujúcej sa rýchlosti vetra ďalej neroztáča, čo by mohlo viesť k jej poškodeniu.



Ako bolo spomínané, maximum vztlaku sa na danom profile vyvodí pri uhle nábehu $4,75^\circ$, preto túto hodnotu volím ako ideálnu a pre ňu bude rotor počítaný. Vlastnosť profilu zabezpečí to, že aj pri výkyve vetra ostane vztlaková sila zhruba na svojom maxime.

$$\alpha = 4,75^\circ \quad (5.19)$$

Pre túto hodnotu nábehového uhla sú koeficienty vztlaku a odporu rovné

$$c_x = 0.01218 \quad [-] \quad (5.20)$$

$$c_y = 0.9485 \quad [-] \quad (5.21)$$

5.2.3 Určenie priemeru rotoru

Rozmer rotoru je priamo určený z výkonu rotoru. Samozrejme, polomer súvisí s plochou rotoru a závislosť plochy na výkone je zrejmá z kapitoly 4.2.2. Ako táto kapitola udáva, maximálna možná účinnosť premeny energie zo vzduchu do rotoru je rovná Betzovej účinnosti a má hodnotu 0,5926, nazýva sa tiež súčiniteľ výkonu. Potom pre výkon rotoru platí

$$P_{rot} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_w^3 \cdot c_p \quad [W] \quad (5.22)$$

Samozrejme ako je tiež uvádzané v kapitole 4.2.2 je hodnota účinnosti 0,5926 vypočítaná pre isté podmienky a tou hlavnou je prúdenie bezo strát. Pri reálnych podmienkach môže dosahovať výkonový súčiniteľ rôzne hodnoty, ktoré závisia na type stroja a jeho prevedení.

Výkon stroja ale závisí aj na účinnosti pracovného stroja. Pre mestské oblasti dáva zmysel ako pracovný stroj jedine generátor elektrického prúdu. Elektrická energia sa dá využiť priamo v elektrickom spotrebiči, alebo ju je možné akumulovať a to pomocou batérií, alebo ju možno využiť pre ohrev teplej vody, prípadne je ju možné distribuovať do siete. V každom prípade, je ale nutné previesť mechanickú energiu rotujúceho rotoru na energiu elektrickú. Tu je rozdiel medzi vidieckymi oblasťami, kde je možné využiť prácu veterného stroja na čerpanie vody. Pre výkon stroja, zahrňujúci účinnosť rotoru a účinnosť generátoru platí

$$P_{el} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_w^3 \cdot c_p \cdot \eta_{gen} \quad [W] \quad (5.23)$$

Pre priemer rotoru potom platí

$$D = \sqrt{\frac{8 \cdot P_{el}}{\rho \cdot v_w^3 \cdot c_p \cdot \eta_{gen} \cdot \pi}} \quad [m] \quad (5.24)$$

Aby sa určil priemer rotoru, je nutné si najprv zvoliť výkon, aký má zariadenie dosahovať. Nie je možné si ho však určiť len tak zhruba, je nutné dbať na isté zásady.

5.2.4 Určenie výkonu zariadenia

Ako je vidieť zo vzťahu 5.22 a 5.23, výkon zariadenia je daný celou radou veličín, pričom najdôležitejšia je rýchlosť vetra. Rýchlosť vetra je však daná geografickými podmienkami a je daná pre istú lokalitu, jej hodnotu konštruktér zariadenia nemôže nijako zmeniť, tiež ako hustotu vzduchu, ktorá je tiež daná podmienkami konkrétnej lokality. Jediné s čím sa dá pri návrhu hýbať je plocha zariadenia, respektíve jeho priemer a tým určovať konečný výkon zariadenia.

Priemer zariadenia ale nemožno voliť úplne ľubovoľne, okrem noriem a nariadení, ktoré sa tejto práci netýkajú, pretože platia pre stroje s výkonom radovo v kW, je pre rozmer stroja určujúce jeho umiestnenie. Z kapitoly 3 vyplýva, že zariadenie bude umiestnené na strechách domov a budov. Pre bezpečnú prevádzku musí platiť, že zariadenie nemôže byť tak veľké, aby pri nepriaznivých podmienkach došlo k jeho havárii, respektíve, že by sa zo strechy utrhol. Preto musí byť do strechy pevne upevnené. Upevnenie ale nie je predmetom práce, napriek tomu ale ovplyvňuje voľbu rozmeru zariadenia. Po konzultácii s niekoľkými stavebnými inžiniermi bolo zistené, že veterné zariadenie by muselo byť prichytené pomocou rámu do nosných trávov strechy, alebo pomocou rámu na nosnú stenu budovy. Každá z týchto možností by ale musela byť jednoznačne skonzultovaná so statikom a statik by k nej musel priložiť svoj posudok. Inak by bolo umiestnenie zariadenia na streche istým hazardom.

Pre zložitosť posudzovania nosnosti strechy respektíve stien sa javí ako najvhodnejšie zvoliť si menší (bezpečný) výkon zariadenia a pre konečný výkon získavaný pre budovy použiť zariadení na streche viac (napríklad dve až tri). Preto volím výkon veterného stroja

$$P_{el} = 20 [W] \quad (5.25)$$

Ďalšou hodnotou, ktorú si treba zvoliť je hodnota výkonového koeficientu c_p . Pri precíznom prevedení vrtule a dobrom návrhu sa môže jeho hodnota pohybovať zhruba na hodnote 0,53. Táto hodnota je zatiaľ len odhadovaná, na konci návrhu vrtule sa dopočíta a hodnoty sa porovnajú. Preto odhadujem túto hodnotu na

$$c_p = 0,5 [-] \quad (5.26)$$

5.2.5 Generátor pre veterný stroj

Vybrať vhodný generátor pre veterný stroj pracujúci v mestách nie je ľahká úloha. Ako už bolo povedané, pre mestské prostredia dáva zmysel veterné zariadenie poháňajúce generátor pre nabíjanie batérií. Preto nie je nutné aby generátor pracoval s pevne danými otáčkami danými frekvenciou v sieti. Je tiež jedno, či sa na dobíjanie použije jednosmerný alebo striedaný prúd (pri použití vhodnej ďalšej regulačnej elektroniky). Pre takto malé výkony dávajú zmysel napríklad dynamá. Ich účinnosť je podľa zdroja [2] pre takto malé výkony len okolo 40%, majú však výhodu pri rôznorodosti svojich provozných otáčok. Pre svoju veľmi nízku účinnosť ale použitie dynamá neprichádza do úvahy. Do popredia sa tak dostávajú asynchrónne, alebo synchronné generátory. Ako mi však bolo povedané na konzultácii na ústave elektrotechniky, v takto malých výkonoch sa tieto generátory ani nevyrábajú a tak či tak najmenšie generátory tohto typu majú len veľmi nízku účinnosť podobne ako dynamá.

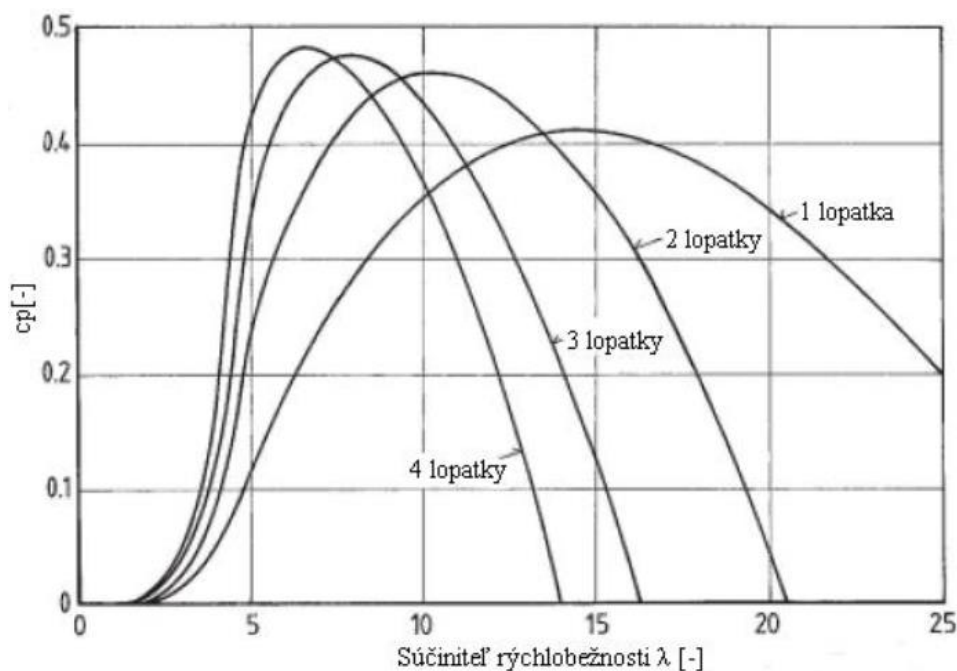
Do úvahy ale prichádza možnosť použiť elektrický motor, elektrické motory pre takéto výkony sa vyrábajú. Je však nutné ich provozovať v generátorovom režime. Tieto malé motorčeky môžu dosahovať účinnosť až 70% a pracovať v širokom pásme otáčok (ideálne sú asynchrónne pre takúto aplikáciu). Samozrejme, že najvyššia účinnosť majú len pri istých ideálnych otáčkach, ale aj pri skeptickom odhade môžeme odhadovať účinnosť generátoru na

$$\eta_{gen} = 0,65 [-] \quad (5.27)$$

Pre prácu respektíve výpočet je dôležitá len účinnosť generátoru, samotný generátor a jeho špecifiká nie sú predmetom práce, ako aj iné zariadenia a príslušenstvo k batériám.

5.2.6 Voľba počtu lopatiek a súčiniteľa rýchlobežnosti

Voľbou súčiniteľa rýchlobežnosti vlastne udávame turbíne jej otáčky. Tento súčiniteľ dáva do pomeru obvodovú rýchlosť na špiči lopatky ku rýchlosti vetru. Dané parametre sa volia na základe zvolenej účinnosti, z tabuliek a grafov, ktoré odporúča literatúra [2] [6] [13] a hlavne [25]. Všeobecne platí, čím vyššie otáčky, tým je potrebných menej lopatiek. Tiež platí, že pri pomalobežných strojoch stačia ako lopatky len ohýbané plechy, nie precízne letecké profily. Pre výrobu elektriny sa v literatúre odporúča stroj s vyššími otáčkami, je to dané charakteristikami generátorov, ktoré pracujú najlepšie pri vyšších otáčkach.



Obr. 5.21 Závislosť výkonového súčiniteľa na rýchlobežnosti pre rôzne počty lopatiek [25]

Z ekonomického hľadiska, je výhodné použiť, čo najmenší počet lopatiek, jedná sa o telesa so zložitou geometriou a ich výroba bude nákladná. Z hľadiska generátoru bude vyhovujúce, ak bude mať turbína vyššie otáčky. Preto volím počet lopatiek

$$B = 2 [-] \quad (5.28)$$

Z obr. 5.21 je tiež vidieť, že turbína s dvoma lopatkami si drží relatívne dobrú účinnosť v širšom pásme otáčok oproti prípadu turbíny s troma lopatkami. Čo znovu nahráva variabilite zariadenia, ktoré pracuje pri rôznych rýchlostiach vetra.

Pre daný počet lopatiek potom jasne z obr. 5.21 vyplýva, že je potrebné zvoliť súčiniteľ rýchlobežnosti

$$\lambda = 10 [-] \quad (5.29)$$

5.2.7 Zhrnutie vypočítaných a zvolených veličín

Tab. 5.2 vstupné veličiny výpočtu geometrie lopatky turbíny.

Veličina	Jednotka	Hodnota
Návrhová rýchlosť	m/s	4,4
Profil SD7032-099-88	-	-
Uhol nábehu α	°	4,75
Súčiniteľ vztlaku c_y	-	0.9485
Súčiniteľ odporu c_x	-	0.01218
Výkon zariadenia P_{el}	W	20
Výkonový koeficient c_p	-	0,5
Účinnosť generátora η_{gen}	-	0,65
Počet lopatiek B	-	2
Súčiniteľ rýchlobežnosti λ	-	10

Podľa uvedených hodnôt sa dá teda konečne dopočítať k priemeru rotoru podľa rovnice 5.24

$$D = \sqrt{\frac{8 \cdot P}{\rho \cdot v_w^3 \cdot c_p \cdot \eta_{gen} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 20}{1,215 \cdot 4,4^3 \cdot 0,5 \cdot 0,65 \cdot \pi}} = 1,23 \text{ [m]}$$

Potom záťažová sila, ktorá pôsobí na os rotoru a musí ju uniesť strecha, respektíve ukotvenie rámu, na ktorom je turbína uložená je podľa zdroja [13], ktorý uvádza, že na turbínu pôsobí takzvaná aerodynamická náporová sila, pri maximálnej rýchlosti nameranej na stanici $v_{max}=8,5$ m/s a koeficiente odporu c_{FB} [-] rovnému 8/9 je

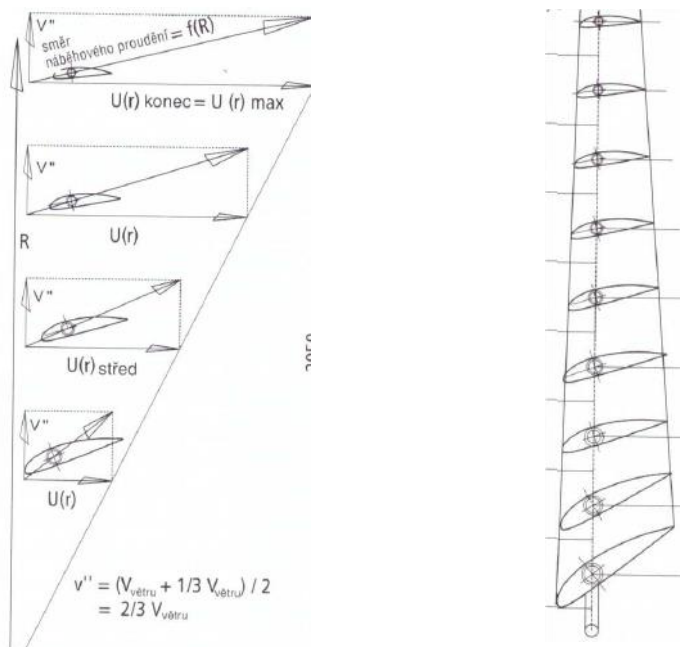
$$F_{nap} = c_{FB} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{max}^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{8}{9} \cdot \frac{1,215}{2} \cdot 8,5^2 \cdot \frac{\pi \cdot 1,23^2}{4} = 46,35 \text{ [N]} \quad (5.30)$$

Ako je vidieť, táto sila nie je veľmi výrazná a pravdepodobne by nespôsobovala veľké problémy pri chode zariadenia aj pri maximálnej rýchlosti, aká bola na stanici nameraná. Z toho vyplýva montáž veterného zariadenia bez veľkých komplikácií a nutnosti samostatného statického posudku. Iná situácia je však pri víchrici, kedy môže byť vietor v nárazoch ešte omnoho silnejší, vtedy bo bolo potrebné použiť brzdu alebo zariadenie inak zabezpečiť, napríklad vytočením rotoru z predpokladaného smeru víchrice, kedy by sa výrazne zmenšila plocha vystavená vetru.

5.2.8 Výpočet lopatiek turbíny

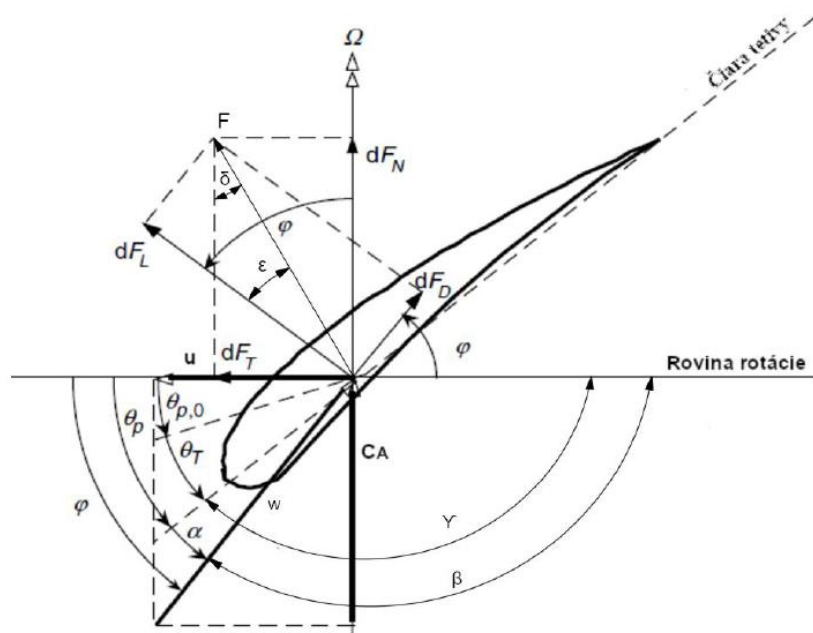
Geometria lopatiek, respektíve celej lopatkovej mreže je závislá len na dĺžke tetivy lopatky a uhlu natočenia profilu v lopatkovej mreži. Dĺžku tetivy je potrebné navrhnuť čo najpresnejšie, pretože je nutné aby každá časť lopatky transformovala z vetra čo možno najväčšie množstvo energie, ktoré je rovné mernej optimálnej práci turbíny rozobranej v kapitole 4.2.3. Ak je dĺžka príliš malá, netransformuje sa celá energia vetra na prácu, ak je

príliš dlhá, dochádza k zbytočným stratám odporom profilu. Uhol nastavenia profilu v lopatkovej mreži sa navrhuje tak, aby aj pri vzrastajúcej obvodovej rýchlosti po dĺžke lopatky bol dodržaný ideálny uhol nábehu a daná časť lopatky mala čo najväčší vztlak pri čo najmenšom odpore. [25] Predstavu o tomto deji dáva obr. 5.22.



Obr. 5.22 Vplyv zmeny rýchlostného trojuholníku na uhol natočenia a dĺžku tetivy (pohľad spredu na turbínu- v smere vetra) [13]

Aby bolo možné výpočet odvodiť, je najprv nutné charakterizovať zložitú geometriu profilu lopatky. Obr. 5.23 zobrazuje geometrické parametre profilu lopatky, taktiež aj sily, pôsobiace na tento element.



F_L - vztlaková sila, F_D -odporová sila
 F_N -axiálna sila, F_T - obvodová sila
[N]

u - obvodová rýchlosť, c_a -axiálna rýchľ.,
 w -relatívna rýchlosť, Ω - uhlová rýchľ.

[m/s]

φ -uhol relatívneho smeru prúdu
 α -uhol nábehu, ϵ - kĺzavý uhol,
 θ_p -uhol odklonu od roviny rotácie
 $\theta_{p,0}$ -uhol odklonu konca lopatky od roviny rotácie
 θ_T -uhol krútenia lopatky
 δ - uhol odklonu výslednej sily od axiálneho smeru
 γ -uhol nastavenia profilu v mreži
 β -uhol relatívnej rýchlosti
[°]

Obr. 5.23 Popis geometrie, rýchlostí a silového pôsobenia na aerodynamickom profile [26]

Pre prehľadnosť výpočtu, keďže práca nie je zameraná na spracovanie metodiky výpočtu, budú uvedené už len odvodené vzťahy, ktoré sú potrebné na dopočet dĺžky tetivy a uhlu nastavenia profilu v lopatkovej mreži. Podrobné odvodenie vzťahov sa dá nájsť v zdrojoch [2],[6], [25], [26] a všetky výpočtové vzťahy ak nie je uvedené inak pochádzajú z týchto zdrojov.

Tetiva profilu

Vzťah pre tetivu profilu vychádza z rovnosti vzťahov pre obvodovú silu vypočítanej z teórie osamoteného profilu a z Eulerovej zovšeobecnenej rovnice pre lopatkovú mrežu. [25] Nasledujúce vzťahy sú potrebné na výpočet dĺžky tetivy

Pre uhol sklonu od axiálneho smeru platí

$$\delta = \varphi - \epsilon \text{ [}^\circ\text{]} \quad (5.31)$$

Pre kĺzavý pomer platí

$$\epsilon = \arctg\left(\frac{c_x}{c_y}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (5.32)$$

Pre uhol relatívneho smeru prúdu na element platí

$$\varphi_r = \arctg\left(\frac{v_a}{u_r}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (5.33)$$

Pre obvodovú rýchlosť na polomere r platí

$$u_r = v_w \cdot \lambda_r = v_w \frac{r}{R} \cdot \lambda \text{ [m/s]} \quad (5.34)$$

Pre axiálnu rýchlosť v rovine rotoru platí

$$v_a = \frac{2}{3} \cdot v_w \text{ [m/s]} \quad (5.35)$$

Relatívna rýchlosť na polomere lopatky r je rovná

$$w_r = \sqrt{v_a^2 + u_r^2} \text{ [m/s]} \quad (5.36)$$

Optimálna merná obvodová práca elementu je rovná

$$a_{opt,r} = \frac{4}{9} \cdot v_w^2 \text{ [J/kg]} \quad (5.37)$$

Pri výpočte sa lopatka pomyselné rozdelí na N elementov a pre ne sú potom spočítané všetky dané veličiny. Počet elementov sa volí

$$N=100 \text{ [-]} \quad (5.38)$$

Polomer jednotlivých elementov, pre ktoré sa lopatka počíta je

$$r_i = R \cdot \left[\frac{R}{N} \cdot (i - 1) + \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{N} \right] \text{ [m]} \quad (5.39)$$

Dĺžka tetivy na polomere r je potom

$$c_r = \frac{4 \cdot \pi \cdot a_{opt}}{B \cdot c_y} \frac{r}{u_r \cdot w_r} \frac{v_a \cdot \cos \epsilon}{w_r \cdot \sin(\varphi - \epsilon)} \text{ [m]} \quad (5.40)$$

Uhol nastavenia profilu v mreži

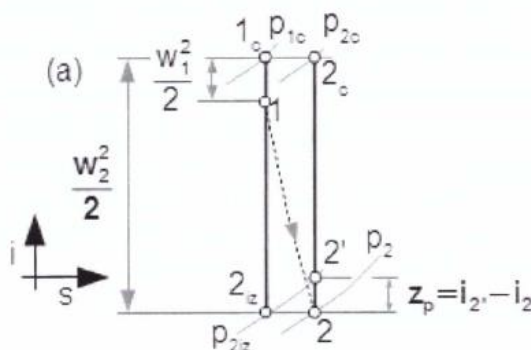
Zisťovaným uhlom je podľa obr. 5.23 je uhol odklonu elementu od roviny rotácie θ_p . Je to uhol roviny rotácie a stredovej čiary tetivy. Dá sa vypočítať nasledovne, na polomere r

$$\theta_{p,r} = \varphi_r - \alpha = \left[\arctg \left(\frac{v_a}{u_i} \right) \right] - \alpha \quad [^\circ] \quad (5.41)$$

Profilové straty

Profilové straty sú jediné, ktoré uvažuje výpočet podľa TLM. Každý element lopatky je navrhnutý tak, aby odvádzal optimálnu mernú prácu, ale keďže sa každý element líši svojím rozmerom a rýchlosťou obtekajúceho prúdenia, má každý element iné straty. Profilové straty sú spôsobené odporom medzi tekutinou a profilom. Zanedbané sú všetky ostatné straty, tak ako už bolo povedané aj v kapitole 4.2.3 (vírením za rotorom, konečným počtom lopatiek).

Ako už bolo povedané v kapitole 4. samotný rotor je pretlakový, to znamená, že tlak pred a za rotorom sú rozdielne pričom rýchlosť tesne pred a tesne za rotorom je približne rovnaká. Vďaka stratám je výstupný tlak vyšší, ako by to bolo pri prúdení bez strát (izoentropickom prúdení), predstavu o tom dáva obr. 5.24



Obr. 5.24 Popis profilových strát znázornených v i-s diagrame [27]

Nasledujúci vzťah pre profilové straty bol prevzatý zo zdroja [27], opäť sú uvedené pre polomer elementu r

$$z_{p,r} = \frac{c_x \cdot w_r^2}{2 \cdot \sin(\beta_r)} \cdot \sigma_r \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (5.52)$$

Kde β_r je uhol relatívnej rýchlosti

$$\beta_r = 180 - \varphi_r \quad [^\circ] \quad (5.53)$$

A σ_r je lokálna hustota lopatkovej mreže podľa [25]

$$\sigma_r = \frac{B \cdot c_r}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [-] \quad (5.54)$$

Potom profilová strata je

$$z_{p,r} = \frac{c_x \cdot w_r^2}{2 \cdot \sin(\beta_r)} \cdot \frac{B \cdot c_r}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (5.55)$$

Skutočný výkon elementu lopatky

Skutočný výkon elementu lopatky je rovný skutočnej mernej obvodovej práci elementu vynásobenej skutočným hmotnostným tokom cez element.

Skutočná merná práca elementu sa líši od ideálnej o profilové straty

$$a_{skut,r} = a_{opt,r} - z_{p,z} \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (5.56)$$

Hmotnostný tok cez element je rovný

$$\dot{m}_r = \rho \cdot v_a \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{R}{N} \quad [kg/s] \quad (5.57)$$

Potom výkon elementu lopatky je rovný

$$P_r = a_{skut,r} \cdot \dot{m}_r \quad [W] \quad (5.58)$$

Výsledky

Na začiatok je ešte nutné uviesť, že v skutočnosti, lopatka nemôže končiť presne v ose rotácie, lopatka je uchytená k hriadeľu. Lopatka sa v blízkosti osi náboja postupne tvaruje tak, aby sa pomocou spoja dala uchytit' na hriadeľ. Preto päta lopatky už nemá aerodynamický profil a prechádza v kruhový tvar. Z toho vyplýva, že tento prechod nemôže odvádzať prácu. V odborných zdrojoch [6], [13], [25] sa uvádza, že tento prechod spolu s úchytom a samotným hriadeľom zaberá 10-15% polomeru rotoru. Preto volím, že elementy od N=90 už nevykonávajú prácu, nemajú aerodynamický profil a nepodieľajú sa na výkone turbíny.

Tab. 5.3 Vypočítané veličiny geometrie lopatky

N	r	Dĺžka tetivy c	Uhol odklonu θ_p	Profilové straty z_p	Skutočná práca elementu a_{skut}	Hmotnostný prietok	Výkon elementu P
[-]	[m]	[m]	[°]	[J/kg]	[J/kg]	[kg/s]	[W]
1	0,611	0,0202	-0,917	1,84	6,76	0,0843	0,57
10	0.556	0.0217	-0.536	1.64	6.96	0.0766	0.53
20	0.495	0.0238	-0.015	1.43	7.17	0.0681	0.48
30	0.433	0.0266	0.651	1.22	7.37	0.0597	0.44
40	0.372	0.0302	1.538	1.03	7.57	0.0512	0.38
50	0.310	0.0354	2.770	0.84	7.75	0.0427	0.33
60	0.249	0.0430	4.597	0.67	7.93	0.0343	0.27
70	0.187	0.0554	7.579	0.50	8.09	0.0258	0.20
80	0.126	0.0786	13.26	0.35	8.25	0.0173	0.14
90	0.064	0.1336	27.66	0.22	8.38	0.0088	0.07

Je tiež nutné uviesť, že konečný tvar lopatky ešte nie je ukončený výpočtom uvedeným vyššie. Okrem prechodu na päta lopatky zhruba na 0-10% polomeru lopatky je nutné lopatku aj nejak ukončiť. Na poslednom elemente, teda pre N=1 a r=0,611 m je ešte stále lopatka tvarovaná aerodynamickým profilom, ak by lopatka nemala správne ukončenie (postupný prechod na zužujúci sa symetrický profil, u malých turbín sa môže využiť vonkajší krúžok spájajúci konce lopatiek), potom by prúdenie na konci takto neukončenej lopatky prúdilo ponad profil z pretlakovej na saciu stranu, čo by vytváralo straty takzvanými indukovanými prúdmi (viac o tejto problematike udáva zdroj [6], [13]). Konečný priemer skutočnej lopatky teda nie je daný vzťahom 5.24, ale až priemerom lopatky zväčšeným o veľkosť tohto ukončenia. Vzťah 5.24 tak udáva len akýsi pracovný priemer lopatky.

5.2.9 Výkon a účinnost stroja

Konečný mechanický výkon sa získa ako súčet všetkých výkonov odvádzaných na elementoch lopatky.

$$P_{mech} = \sum_{i=1}^{90} P_{r,i} = 31,017 \text{ [W]} \quad (5.59)$$

Elektrický výkon je mechanický výkon vynásobený účinnosťou generátora

$$P_{el} = P_{mech} \cdot \eta_{gen} = 31,017 \cdot 0,65 = 20,16 \text{ [W]} \quad (5.60)$$

Nakoniec je vhodné znovu vypočítať na začiatku odhadnutý výkonový koeficient. Najprv je však vhodné vypočítať výkon nerušeného prúdu vzduchu, prechádzajúci cez rotor o polomere R

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_w^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,215 \cdot \pi \cdot 0,615^2 \cdot 4,4^3 = 61,489 \text{ [W]} \quad (5.61)$$

Potom výkonový koeficient je rovný

$$c_p = \frac{P_{mech}}{P_w} = \frac{31,017}{61,489} = 0,5044 \text{ [-]} \quad (5.62)$$

Ako je vidieť, výkonový koeficient, aj výkon stroja sa zhodujú s odhadnutými hodnotami a preto nie je nutné znova prepočítavať priemer rotora. Ak by výkonový koeficient nesedel s odhadovanou hodnotou, tak by bolo nutné takto novo vypočítaný koeficient dosadiť do vzťahu 5.24 a teda prepočítať rotor ešte raz.

Pre kontrolu je ešte nutné overiť odhadované Reynoldsovo číslo, z ktorého sa vychádza pri určovaní parametrov aerodynamického profilu. Samozrejme, Reynoldsovo číslo sa bude meniť na každom elemente lopatky, keďže vo vzťahu figuruje relatívna rýchlosť prúdenia a rozmer tetivy profilu, ktoré sú pre každý element lopatky odlišné. Z výpočtov však vyplýva, že sa hodnota Re príliš na elementoch nelíši a preto uvádzam výpočet pre $N=1$

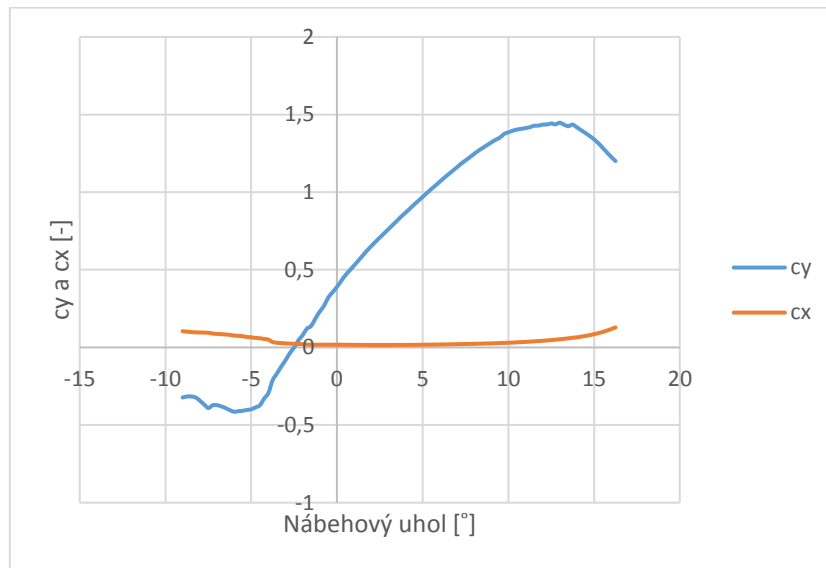
$$Re_1 = \frac{w_1 \cdot c_1}{\nu} = \frac{43,878 \cdot 0,0202}{14,47 \cdot 10^{-6}} = 61\,277 \text{ [-]} \quad (5.63)$$

Ako je vidieť, hodnota Reynoldsovho čísla sa líši od odhadovaného a z literatúry doporučovaného $Re=200\,000$ dosť značne. Takýto rozdiel Reynoldsových čísiel vôbec neprichádza do úvahy, pretože pre zistenú hodnotu budú úplne iné vlastnosti profilu ako sú ideálny uhol nábehu, vztlakový a odporový koeficient a preto by lopatka mala vyzeráť úplne inak ako je v terajšom výpočte. Takto veľkú chybu si vo výpočte nemôžem dovoliť a tak je nutné Reynoldsovo číslo odhadnúť inak a celý výpočet znova zopakovať.

5.2.10 Korekcia výpočtu veterného stroja

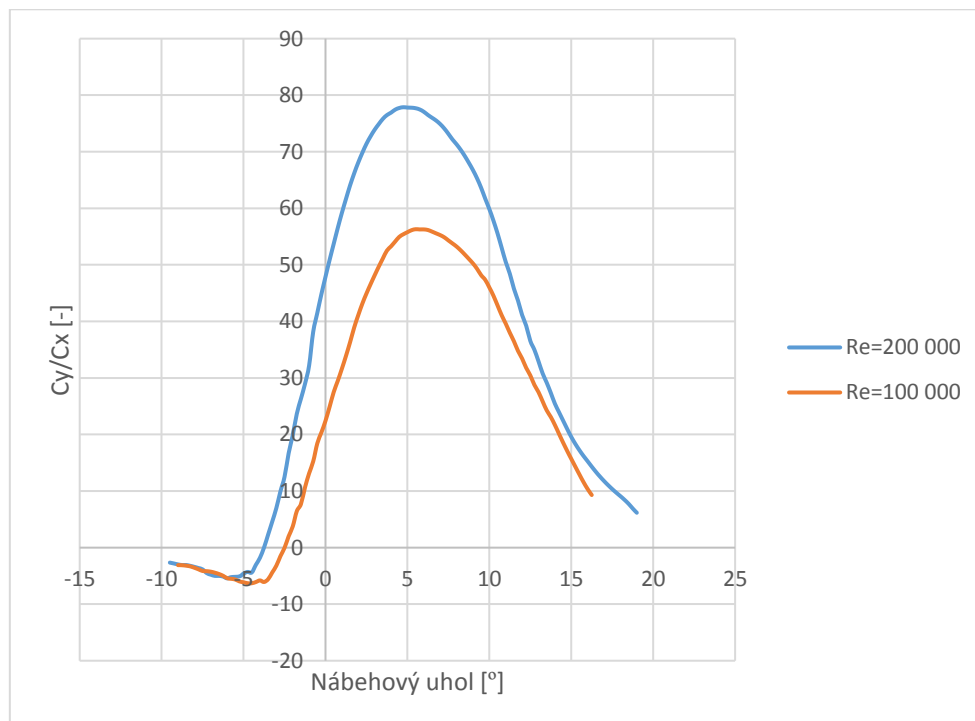
Ako už bolo spomenuté, je nutné kvôli veľkej chybe znova odhadnúť Re , aj napriek tomu, že literatúra odporúčala Re voliť na hodnote 200 000. Môže to byť spôsobené tým, že v literatúre sa spravidla jedná o veterné stroje s výkonom viac ako 1 kW, kde sú teda pomery prúdenia ako aj pomer zotrvačných síl a síl viskózných značne iné ako pri stroji, ktorý je mnohonásobne menší. Pri menšom stroji sa dá predpokladať, že vplyv trenia, teda odporu prostredia na celkový odpor profilu bude o čosi väčší ako je to pri veľkých strojoch. Preto, pri malom stroji bude aj Reynoldsovo číslo menšie.

Z uvedených důvodů je nutné určit vlastnosti profilu pro nižší Reynoldsovo číslo. Data ze zdroje [24] uvádějí naměřené hodnoty charakteristik profilu pro $Re=50\,000$, $100\,000$, $200\,000$. Pro další iteraci odhaduji $Re=100\,000$. Potom charakteristiky profilu vyzerajú nasledovne.



Obr. 5.25 Priebeh závislosti koeficientov c_y a c_x na uhle nábehu pre hodnotu $Re=100\,000$ [24]

A pre výpočet dôležitý pomer c_y/c_x vyzerá nasledovne pre $Re=100\,000$. Pre porovnanie je uvedená aj pôvodná závislosť $Re=200\,000$



Obr. 5.26 Závislosť pomeru c_y/c_x na uhle nábehu pre profil SD7032-099-88 a rôzne hodnoty Reynoldsovho čísla [24]

Z obr. 5.16 a 5.25 je vidieť, že závislosť koeficientu vztlaku na uhle nábehu je aj pre rôzne Reynoldsove čísla veľmi podobná. V čom sa ale hodnoty líšia je koeficient odporu, ktorý je v prípade meraní pre $Re=100\,000$ väčší, z čoho vyplýva aj rozdiel pomeru týchto koeficientov v obr. 5.26. Pri zväčšenom koeficiente odporu pri nízkych hodnotách Re narastú straty, teda klesne skutočná práca a koniec koncov aj výkon. Ak chceme profilovú stratu znížiť, musí sa podľa vzťahu 5.55 niečo zmeniť v geometrii, prípadne v parametroch turbíny. Najväčší vplyv na straty má relatívna rýchlosť prúdenia, ktorá je z väčšej časti závislá na obvodovej rýchlosti, ktorá je zase závislá na otáčkach respektíve na koeficiente rýchlobežnosti. Takýmto myšlienkovým postupom je vidieť, že aby sa znížili straty, musí sa prehodnotiť rýchlobežnosť, ktorá bola na začiatku výpočtu len zvolená podľa odporúčaní.

Znova sa ukazuje, ako to bolo aj v prípade odporúčaní hodnoty Re , že odporúčané hodnoty sa líšia pokiaľ ide o malé alebo veľké zariadenia. Teda sa úplne nedá vychádzať z obrázku 5.21 pri voľbe rýchlobežnosti z účinnosti stroja. Ako bolo vo výpočte dokázané, maximálna účinnosť turbíny s dvoma lopatkami vychádza pri $\lambda = 8$, teda pre nízke hodnoty Re , respektíve malé stroje sú maximálna účinnosti z obr. 5.21 posunuté viac doľava.

Na základe početných iterácií boli nakoniec pre návrh turbíny zvolené tieto parametre

Tab. 5.4 Skorigované vstupné veličiny do výpočtu lopatky turbíny

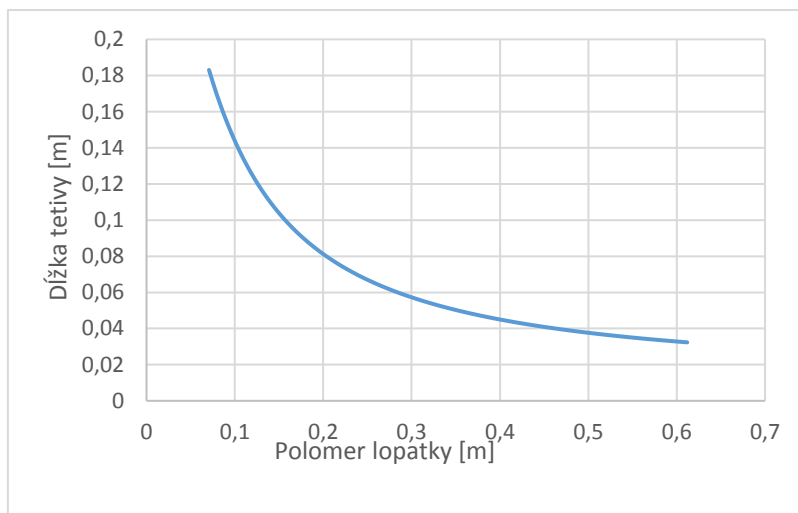
Veličina	Jednotka	Hodnota
Návrhová rýchlosť	m/s	4,4
Profil SD7032-099-88	-	-
Uhol nábehu α	°	4,75
Súčiniteľ vztlaku c_y	-	0.9447
Súčiniteľ odporu c_x	-	0.01705
Výkon zariadenia P_{el}	W	20
Výkonový koeficient c_p	-	0,5
Účinnosť generátora η_{gen}	-	0,65
Počet lopatiek B	-	2
Súčiniteľ rýchlobežnosti λ	-	8

Ako je z tabuľky vidno, zmenili sa parametre profilu, pričom uhol nábehu bol zvolený nie v maxime závislosti z obr. 5.26 z dôvodu minimalizovania koeficientu odporu. Tiež rýchlobežnosť bola zo spomenutých dôvodov, teda minimalizovania profilových strát zvolená na nižšej hodnote. Priemer rotora ostáva na pôvodnej hodnote.

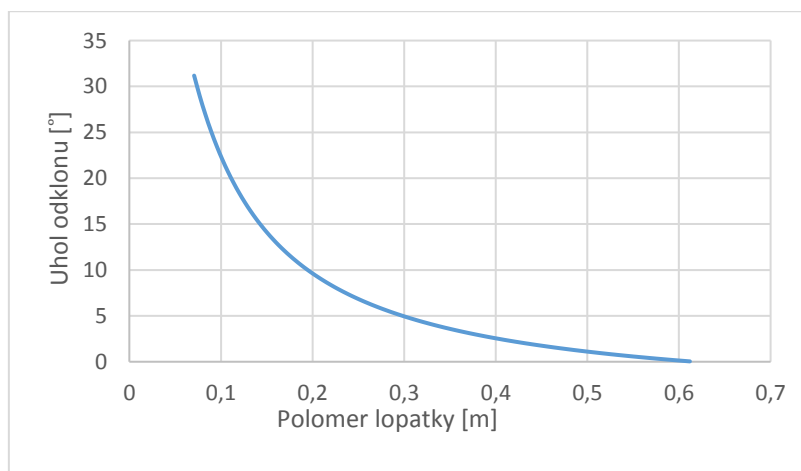
Pre prehľadnosť už nebudú uvedené výpočty a výpočetné vzťahy, ale len výsledky výpočtu geometrie lopatky.

Tab.5.4 Skorigované veličiny geometrie lopatky

N	r	Dĺžka tetivy c	Uhol odklonu θ_p	Profilové straty z_p	Skutočná práca elementu a_{skut}	Hmotnostný prietok	Výkon elementu P
[-]	[m]	[m]	[°]	[J/kg]	[J/kg]	[kg/s]	[W]
1	0,611	0,0323	0,037	2,12	6,48	0,084	0,54
10	0,556	0,0346	0,511	1,88	6,71	0,076	0,51
20	0,495	0,0379	1,160	1,63	6,96	0,068	0,47
30	0,433	0,0421	1,991	1,40	7,20	0,059	0,43
40	0,372	0,0477	3,092	1,17	7,42	0,051	0,38
50	0,310	0,0556	4,620	0,96	7,63	0,042	0,32
60	0,249	0,0672	6,876	0,76	7,83	0,034	0,26
70	0,187	0,0858	10,531	0,58	8,02	0,025	0,20
80	0,126	0,1198	17,371	0,41	8,18	0,017	0,14
90	0,064	0,1935	33,687	0,29	8,31	0,008	0,07



Obr. 5.27 Rozloženie dĺžky tetivy lopatky v závislosti na polomere lopatky [autor]



Obr.5.28 Rozloženie uhlu odklonu od roviny rotácie v závislosti na polomere lopatky [autor]

5.2.11 Výkon a účinnost' skorigovanej veternej turbíny

Výpočet konečných výkonov a účinnosti je vypočítaný rovnako ako v kapitole 5.2.9. Pre prehľadnosť sú znova uvedené len konečné výsledky

$$P_{mech} = \sum_{i=1}^{90} P_{r,i} = 30,285 \text{ [W]} \quad (5.64)$$

$$P_{el} = P_{mech} \cdot \eta_{gen} = 30,285 \cdot 0,65 = 19,68 \text{ [W]} \quad (5.65)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_w^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,215 \cdot \pi \cdot 0,615^2 \cdot 4,4^3 = 61,489 \text{ [W]} \quad (5.66)$$

$$c_p = \frac{P_{mech}}{P_w} = \frac{30,285}{61,489} = 0,4925 \text{ [-]} \quad (5.67)$$

$$Re_1 = \frac{w_1 \cdot c_1}{\vartheta} = \frac{35,14 \cdot 0,0323}{14,47 \cdot 10^{-6}} = 78\,607 \text{ [-]} \quad (5.68)$$

Ako je vidieť zo vzťahov 5.65 a 5.67, hodnoty konečného výkonu a výkonového koeficientu sa už líšia od odhadnutých hodnôt trochu viac ako to bolo v predošlom výpočte. Chyba je však len niekoľko desiatín. Keby je táto chyba väčšia, musel by sa s takto vypočítanými hodnotami prepočítať nanovo priemer rotoru, po dosadení do vzťahu 5.24 by sa však zistilo, že novo získaný priemer je len o 1 mm väčší ako pôvodne vypočítaný (pri zachovaní rovnakého výkonu ale použitím novo vypočítaného výkonového koeficientu). Preto tieto chyby zanedbám, vzhľadom aj na to, že prúdenie v meste môže vykazovať oveľa väčšie odchýlky od zidealizovanej návrhovej rýchlosti (turbulencie, smer, veľkosť, premennosť...) a tak sa tieto chyby prúdenia môžu oveľa viac prejaviť na konečnom výkone zariadenia.

Ako je tiež vidieť zo vzťahu 5.68, hodnota Re sa znova líši od návrhového $Re=100\,000$. Chyba je však v tomto prípade výrazne menšia. Hodnota $Re=78\,607$ sa nachádza síce medzi $50\,000$ a $100\,000$, pre ktoré sú poskytnuté zo zdroja [24] zdrojové údaje, ale závislosti namerané pre hodnotu $Re=50\,000$ vyzerajú prinajmenšom podozrivo a zdá sa, že boli namerané pre veľmi málo rôznych uhlov nábehov (závislosti vyzerajú „zubato“), preto síce s nevelkou chybou sa radšej prikláňam k tomu, že výsledky sú správne pre vlastnosti profilu namerané pri $Re=100\,000$.

V reálnom prípade, kedy by bolo potrebné zariadenie odskúšať by v tomto bode bolo dobré lopatky vyhotoviť a zistiť, ako moc sa líši výkon od návrhovej hodnoty, pretože pri Re zistenom zo vzťahu 5.68 bude pravdepodobne o kúsok vyšší koeficient odporu, koeficient vztlaku sa pravdepodobne výrazne nezmení a teda profilové straty budú väčšie. Ak by bola veľká chyba medzi reálnym výkonom a navrhnutým výkonom, bolo by potrebné koeficient odporu vhodne odhadnúť, znížiť vhodne koeficient rýchlobežnosti (pričom koeficient vztlaku a vhodný nábehový uhol by mohli ostať rovnaké, pretože sa pri zmene Re príliš nemenia) a lopatky opäť prepočítať a porovnať znova nanovo vypočítané Reynoldsovo číslo. Je však otázne, či by takto precízny výpočet priniesol veľký prínos pre veternú turbínu pracujúcu v tak variabilnom a nestálom prostredí.

5.3 Vlastnosti a přínosy navrženého větrného stroja

Část vlastností stroja bola už určená v predošlej kapitole, jedná sa hlavne o výkon zariadenia s jeho účinnosťou. Tiež už boli určené napríklad otáčky stroja, počet lopatiek, profil lopatiek a ich geometria. Vychádzalo sa však z návrhovej rýchlosti vetra, pri ktorej by mal stroj vyrobiť v konkrétnej lokalite najväčšie množstvo energie. Preto je vhodné v rámci prínosov zariadenia určiť, koľko energie tento stroj reálne vyrobí a aké má ďalšie výhody.

5.3.1 Množstvo energie vyrobenej strojom

Prístup uvažujúci energetické zhodnotenie len pri návrhovej rýchlosti a variabilná vlastnosť profilu je využitá na pokrytie dôb oscilácie rýchlostí okolo návrhovej rýchlosti

Pri známom výkone je energia dodaná zariadením daná vzťahom

$$E_c = P_{el} \cdot t_{celkový} [J] \quad (5.69)$$

Kde $t_{celkový}$ je čas, kedy zariadenia podáva daný výkon. Vzhľadom na kalendárny rok, pre ktorý bola návrhová rýchlosť počítaná sa dá čas vyjadriť nasledovne

$$t_{celkový} = (\text{počet dní výskytu návrhovej rýchlosti}) \cdot (\text{doba trvania veterného dňa}) [s] \quad (5.70)$$

Prvý člen zo vzorca 5.70 je už určený v kapitole 5.1.3 jedná sa o spomínané Weibullove rozdelenie početností rýchlostí (absolútne). Druhý člen ale už nie je tak jednoduché určiť, ako ale udáva kapitola 5.11- bežný deň na staniaciach veterný charakter počasia je v danej lokalite zhruba pravidelný, ako ukazujú obrázky 5.5 a 5.6. Vietor sa v danej lokalite ráno zdvíha a podvečer ustáva, je však jasné, že nie každý deň je rovnaký a pri dobe trvania veterného počasia rozhoduje aj ročné obdobie. Je tak nutné danú hodnotu odhadnúť. Ako je vidieť z rozdelenia rýchlostí vetra z obr. 5.7 a 5.8, najčastejšie sú dni, kedy fúka len veľmi málo a vietor má zhruba rýchlosť 2 m/s, jedná sa o málo veterné dni, kedy sa dá predpokladať, že veterný charakter počasia je veľmi kľudný a doba trvania vetra je veľmi nízka. Návrhová rýchlosť však vyšla dvojnásobná ako je najčastejší deň, dá sa teda predpokladať, že tieto dni bol charakter počasia veternejší (ovplyvnení presunom tlakových výší a níží) a doba trvania by mohla byť vyššia, napríklad taká aká je na obr. 5.5 a 5.6. Preto odhadujem

$$\text{doba trvania veterného dňa} = t_{trvanie} = 10 [h] = 10 \cdot 60 \cdot 60 [s] = 36\,000 [s] \quad (5.71)$$

Ako však obr. 5.5 a 5.6 ukazujú, rýchlosť vetra v dni stúpne a potom osciluje okolo istej strednej hodnoty, pravdepodobne vplyvom zmeny smeru vetra a členitosťou mestského prostredia. Túto zmenu doba trvania dňa nezahŕňa avšak ako je dokázané v tab. 5.1 v kap. 5.2.2 výberom vhodného profilu ktorý umožňuje istú zmenu uhla nábehu prúdu na profil pri zachovaní jeho charakteristik sa chovanie stroja pri osciláciách vetra príliš nezmení (samozrejme, že výkon kúsok stúpne/klesne s osciláciou rýchlosti vetra). Tab. 5.1 udáva túto zmenu rýchlosti vetra pri zachovaní jeho vlastností na $4,4 \pm 1$ m/s. Môžeme teda s istou chybou povedať, že výkon zariadenia ostáva pri dobe trvania dňa konštantný na vypočítanej hodnote.

Istú predstavu o množstve energie vetra podávanej pri početnosti tejto rýchlosti ukazuje aj obr. 5.12 a 5.13. jedná sa však o merný výkon vetra vynásobením jeho početnosťou. Pre získanie hodnoty energie premenenej z vetra je nutné túto závislosť doplniť o rozmer zariadenia, účinnosti premien energie a časový údaj. Ako početnosť výskytu sa musí použiť

absolútna distribučná funkcia, nie relatívna, ako je vysvetlené v kap. 5.1.3, aby rešpektovala reálny počet dní. Daný vzťah potom vyzerá nasledovne a vychádza zo vzťahu 5.69

$$\begin{aligned} E_{c,4,4} &= P_{el} \cdot t_{celkový} = (P_{mech} \cdot \eta_{gen}) \cdot (f(\text{Weibull} - \text{absolutny} 4,4) \cdot t_{trvanie}) \\ &= (P_{mech} \cdot \eta_{gen}) \cdot \left[\left(\frac{1,936}{3,044} \cdot \left(\frac{v_w}{3,044} \right)^{1,936-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{v_w}{3,044} \right)^{1,936} \right] \cdot 365,0,84 \right) \right] \cdot t_{trvanie} \\ &= (30,285,0,65) \cdot (35,77,36000) = 25\,349\,090 \text{ [J]} = \frac{25\,349\,090}{3600,1000} \text{ [kWh]} = 7,04 \text{ [kWh]} \end{aligned}$$

Ako je vidieť, po dosadení do vzťahu 5.69 je množstvo energie vyrobenej ročne len 7,04 kWh, je však na obranu zariadenia nutné uviesť, že je veľmi malé a pracuje vo veľmi nepriaznivých podmienkach čo sa týka rýchlostí vetra. Pre iné krajiny, napríklad prímorské mestá a zastavané oblasti by návrhová rýchlosť vetra mohla vychádzať o niečo vyššia, čo by výkon zariadenia značne zvýšilo, bol by však potrebný nový návrh zariadenia pre túto rýchlosť.

Ako je tiež vidieť z dosadenia do Weibullovej funkcie a tiež z obr. 5.9, počet dní pripadajúci pre návrhovú rýchlosť 4,4 m/s je zhruba 35 dní, čo je z celého roka len malá časť a mohlo by sa zdať, že ostatné dni je veterná turbína nevyužitá. Nastáva však otázka, prečo nevyužiť napríklad rýchlosť vetru zhruba o hodnote 2,2 m/s, ktorou podľa nameraných dát fúkalo zhruba tretinu roka. Pre jednoduchosť príkladu ostane doba trvania dňa rovnaká, pre jednoduchosť tiež uvažujme mechanickú účinnosť turbíny takú istú ako vypočítanú a to na hodnote $c_p=0,4925$. Dosadíme teda pre príklad do vzorca 5.69, teraz ale s inými hodnotami

$$\begin{aligned} E_{c,2,2} &= P_{el} \cdot t_{celkový} = (P_{mech} \cdot \eta_{gen}) \cdot (f(\text{Weibull} - \text{absolutny} 2,2) \cdot t_{trvanie}) \\ &= \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_w^3 \cdot c_p \cdot \eta_{gen} \right) \cdot \left[\left(\frac{1,936}{3,044} \cdot \left(\frac{v_w}{3,044} \right)^{1,936-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{v_w}{3,044} \right)^{1,936} \right] \cdot 365,0,84 \right) \right] \cdot t_{trvanie} \\ &= \left(\frac{1}{2} \cdot 1,215 \cdot \pi \cdot 0,615^2 \cdot 2,2^3 \cdot 0,4925 \cdot 0,65 \right) \cdot (84,4,36000) \text{ [J]} = \frac{7\,476\,166}{3600,1000} \text{ [kWh]} \\ &= 2,07 \text{ [kWh]} \end{aligned}$$

Po dosadení je vidieť, že aj pri rýchlosti 2,2 m/s nie je energetický výťažok úplne zanedbateľný. Veterný stroj by mal pri takejto rýchlosti stále fungovať dobre, možnosť premenných otáčok generátoru umožní to, že zariadenie pri nižšej rýchlosti vetra prirodzene spomalí svoje otáčky a teda ideálny uhol nábehu bude stále dodržaný. Čo ale nemusí byť dodržané je účinnosť generátoru na tejto hodnote otáčok, generátor by veľmi pravdepodobne mal pri nižších otáčkach aj nižšiu účinnosť (pri odchylke od menovitých otáčok). Doba trvania pri nižšej rýchlosti vetra tiež veľmi pravdepodobne nebude 10 hodín a bude nižšia. Vplyvom týchto negatívnych vlastností sa môže očakávať že odchylka od vypočítanej hodnoty 2,07 kWh bude značná a že túto energiu môžeme v konečnom dôsledku zanedbať.

V konečnom dôsledku, ako je vidieť z výpočtov, variabilita zariadenia nemusí byť úplne široká a úplne stačí ak zariadenie je variabilné do takej miery aby pokrylo výkyvy vetra v priebehu dňa o hodnote ± 1 m/s od návrhovej rýchlosti. Preto úplne stačí ak má generátor ideálnu účinnosť len pri menovitých otáčkach veternej turbíny a o variabilitu pri zmene rýchlostí vetra sa postará vlastnosť aerodynamického profilu. Pri iných rýchlostiach vetra zariadenie pravdepodobne bude fungovať, ale vplyvom strát na generátore a pravdepodobne krátkou dennou dobou trvania vetra o danej rýchlosti bude ročný energetický výťažok z týchto rýchlostí vetra malý.

Prístup uvažujúci energetické zhodnotenie aj rozmedzie variabilných rýchlostí uvedených v tab. 5.1, teda rýchlostí, kedy vlastnosti generátoru a stroja budú ešte na vysokej úrovni

Iný prístup k stanoveniu ročného energetického prínosu zariadenia podávajú zdroje [16] a [17]. Pri tomto prístupe sa zvolí rozmedzie rýchlostí, pre ktoré chceme zistiť z absolútnej Weibullovej funkcie početnosť dní, kedy boli zaznamenané. V našom prípade sú to hodnoty z tabuľky 5.1, konkrétne $4,4 \pm 1$ m/s. Pre tieto rýchlosti sa vzhľadom na početnosť a dennú dobu výskytu vypočíta energetický prínos. Opäť ostáva rovnaká denná doba pôsobenia vetra a to 36 000 s. Tento prístup uvažuje, že variabilné rýchlosti neslúžia len na prekrytie oscilácií rýchlostí okolo návrhovej rýchlosti, ale že zariadenie pracuje aj dni, kedy nefúka návrhovou rýchlosťou ale fúka vietor o rýchlosti vymedzenej variabilnými rýchlosťami pri zachovaní otáčok teda ideálnych účinností stroja a generátoru. Vzťah pre výpočet vyzerá nasledovne

$$\begin{aligned}
 E_{c,5,4-3,4} &= \int_{3,4}^{5,4} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_w^3 \cdot c_p \cdot \eta_{gen} \right) \cdot (f(Weib. - abs.)) \cdot t_{trvanie} \cdot dv_w = 47\,531\,762 \text{ [J]} \\
 &= \frac{47\,531\,762}{1000 \cdot 3600} \text{ [kWh]} \\
 &= 13,2 \text{ [kWh]}
 \end{aligned} \tag{5.72}$$

Ako je vidieť, druhý prístup výpočtu vyprodukovanej energie ukázal, že v rámci rozmedzia variabilných rýchlostí zariadenie môže vyprodukovať až dvojnásobné množstvo energie oproti prístupu, ktorý uvažuje fungovanie turbíny len pri návrhovej rýchlosti. Tento výsledok považujem za správnejší, pretože všetky voľby pri návrhu zariadenia boli spravené tak aby mohlo pracovať aj pri nenávrhových stavoch a teda bolo cieľom aby zariadenie získavalo energiu aj z iných rýchlostí, ako je návrhovú.

Zároveň sa predpokladá, že účinnosti premien energie ostávajú zachované. Pri konštantných otáčkach to tak bude, je však jasné, že pri nižšej rýchlosti vetra otáčky zariadenia klesnú, pri vyššej rýchlosti vetra zase vzrastú. Predpokladám však, že za pôsobenia vetra z daného intervalu ideálnych (variabilných) rýchlostí vetra sa otáčky zariadenia nezmenia príliš a teda účinnosti sú zachované.

Vplyv variability aerodynamického profilu na chod zariadenia

- Pri pôsobení návrhovej rýchlosti vetra variabilita profilu vykrýva oscilácie v dennom priebehu rýchlostí a umožňuje tak nepretržitý chod s ideálnymi vlastnosťami aj pri týchto osciláciách.
- Pri pôsobení rýchlostí z intervalu variabilných rýchlostí (tab. 5.1) zariadenie môže pracovať pri dobrých vlastnostiach komponent a v konečnom dôsledku pracovať aj dni kedy zrovna nefúka pri ideálnej návrhovej rýchlosti vetra a preto sa predĺži doba funkcie turbíny.

Je tiež nutné zopakovať, že systém veterných zariadení je navrhnutý tak, aby ich na jednej budove mohlo byť viac, celkový energetický výtťažkom teda bude teda o toľko násobne väčší, koľko zariadení bude na budove

5.3.2 Využitelnost veternej elektrárne

Využitelnostou veternej elektrárne sa myslí percentuálna hodnota, ktorá vyjadruje odhadnuté množstvo vyrobenej elektriny k hodnote vyrobenej elektriny, ktoré by elektrárne vyrobila, ak by fungovala na plný výkon celý rok (aj cez noc).

Energia, ktorú by dodala elektrárne za rok plného fungovania je

$$E_{c,rok} = P_{el} \cdot t_{rok} = 19,68 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 620\,628\,480 \text{ [J]} = 172,39 \text{ [kWh]} \quad (5.73)$$

Potom koeficient využitelnosti je

$$k_{využ} = \frac{E_{c,5,4-3,4}}{E_{c,rok}} = \frac{13,2}{172,39} = 0,076 \text{ [-]} \quad (5.74)$$

Ako je vidieť, koeficient využitelnosti voči ročnému plnému zhodnoteniu výkonu turbíny je malý, oveľa menší, ako je to napríklad pri väčších veterných elektrárnach, ktoré môžu dosahovať využitelnosť až nad 20%. [25] Koeficient využitelnosti však závisí predovšetkým na stanovišti, ktoré sa do istej miery nedá ovplyvniť (pre konkrétne umiestnenie-budovu sa dá ovplyvniť umiestnenie na streche, ale globálny charakter veterného počasia v danej lokalite sa ovplyvniť nedá).

Ak by sme však odmysleli to, že fúka aj cez noc a denná doba veterného dňa by bola nie 24 hodín ale len 10, potom by koeficient využitelnosti vyzeral nasledovne

$$k_{využ,10h} = \frac{E_{c,5,4-3,4}}{E_{c,rok10h}} = \frac{13,2}{(19,68 \cdot 365 \cdot 10 \cdot 60 \cdot 60) / 3600000} = \frac{13,2}{71,832} = 0,1837 \text{ [-]} \quad (5.75)$$

Správnejšia hodnota je však tá zo vzťahu 5.74, slúži ako porovnávacia hodnota pre rôzne lokality umiestnení veterných turbín. Vzťah 5.75 by sa dal použiť napríklad pre lokalitu Brno, kde sa dá odhadnúť dĺžka veterného počasia za deň na 10 hodín.

5.3.3 Podpora výroby energie z obnoviteľného zdroja

V dnešnej dobe, kedy sa veľmi pretlačuje výroba energií z obnoviteľných zdrojov (ďalej ako OZE) sa tieto zdroje značne od štátu podporujú, aby sa konečným užívateľom energií ako aj výrobcami energie finančne oplátilo vyrábať energiu z obnoviteľného zdroja, pretože bez tejto podpory, by sa niekedy vôbec nemuselo finančne vyplácať vyrábať energiu z OZE.

Na výrobu energie v akejkoľvek forme je treba licencie, ktorú udeľuje energetický regulačný úrad (ďalej ako ERU). Získanie licencie na výrobu energie je komplikovaný proces, dôležité je ale poznamenať, že ERU musí o výrobcovi energie vedieť a nemožno si postaviť elektrárne len tak na vlastnú päsť. Malé energetické zdroje, ako sú napríklad fotovoltaické panely, alebo malé veterné elektrárne sú však zvýhodnené a teda na ich prevádzku nie je potrebná licencia od ERU, vyhlásenie ERU podľa zdroja [40] vyzera nasledovne:

Na základě novely EZ zákonem č. 131/2015 Sb. a příslušných ustanovení EZ zejména § 3 odst. 3, § 28 odst. 5 a odst. 6, je možné od 1. 1. 2016 provozovat výrobu elektřiny připojenou k elektrizační soustavě do instalovaného výkonu 10 kW bez licence, není-li již v daném odběrném místě připojena jiná výrobní elektrárna držitele licence. Pokud by se jednalo

o zrušení licence u stávající výroby elektřiny, kdy je nárokována podpora podle zákona č. 165/2012 Sb., upozorňujeme, že v takovém případě není již možné podporu nárokovat.

Forma podpory je ale už niečo iné. Štát podporuje výrobu energie finančne, podľa toho koľko energie daný zdroj vyrába. Podpora má však dve stránky a to podporu vo forme výkupnej ceny energie alebo zelené bonusy, dané podpory však nie je možné kombinovať a je len na konečnom prevádzkovateľovi zariadenia ktorú formu podpory si vyberie. Konkrétne formy podporu sú podľa zdroja [40] uvedené nižšie:

Tab. 5.5 Podpora výroby energie z OZE podľa [40]

Podporovaný druh energie	Uvedenie do prevádzky od-do	Výkupná cena [Kč/kWh]	Zelený bonus [Kč/kWh]
Veterná	1.1.-31.12.2019	1,93	1,08
Fotovoltaika	1.7.-31.12.2013	3,367	2,177

Ako je vidieť z tabuľky 5.5, je výkupná cena alebo zelený bonus veľmi nízky vzhľadom na to, koľko energie veterné zariadenie vyprodukuje. Ani systém zložený z fotovoltaiiky a niekoľkých malých veterných turbín by si pravdepodobne vzhľadom na počiatkové náklady na seba nezarobil. Tieto bonusy sú vhodné pre výkonnejšie systémy alebo elektrárne. Je tak nutné hľadať, kde by takýto systém mohol ušetriť. Výhodou vlastnej produkcie elektřiny pre budovu je to, že daná energia je pri odmyslení počiatkových nákladov zadarmo, teda budove sa obmedzí príjem energie z verejnej siete, ktorá je spoplatnená.

Cena elektrickej energie v ČR záleží na konkrétnom dodávateľovi a službe, ktorú si od dodávateľa konečný užívateľ zvolí, ceny sa však pohybujú zhruba od 0,9-1,5 Kč/kWh podľa [41].

Z celkového hľadiska sa zdá, že ceny výkupu a ceny elektriny nie sú závažné a v prípade konkrétneho návrhu nízko výkonového veterného zariadenia budú ušetrené peniaze takmer zanedbateľné. Len pre predstavu je uvedený výpočet množstva peňazí, ktoré za rok jedna malá turbína ušetrí alebo získa. Ako celková vyrobená energia zariadenia je uvažovaná hodnota 13,2 kWh a ako cena elektriny je uvažovaná zhruba hodnota $c_{ušetrená}=1,2$ Kč/kWh. Ako výkupná cena je uvažovaná hodnota $c_{výkupná}=1,93$ Kč/kWh, potom je celková cena týchto bonusov nasledovná:

$$C_{výkup} = c_{výkupná} \cdot E_{c,5,4-3,4} = 1,93 \cdot 13,2 = 25,48 \text{ [Kč]} \quad (5.76)$$

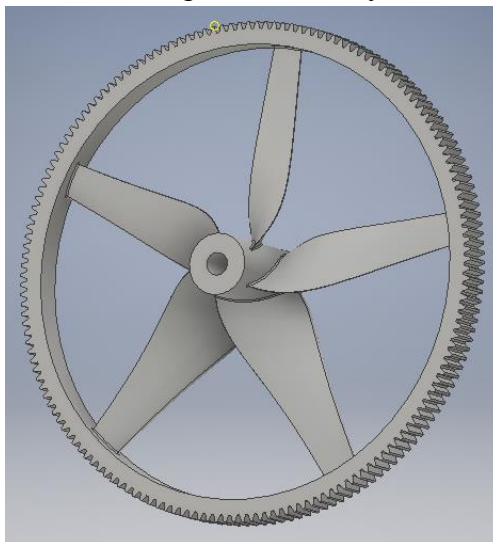
$$C_{šetrenie} = c_{ušetrená} \cdot E_{c,5,5-3,4} = 1,2 \cdot 13,2 = 15,84 \text{ [Kč]} \quad (5.77)$$

Ako je vidieť z rovníc 5.76 a 5.77, ušetrené peniaze za rok nie sú veľmi veľké, práve naopak, sú až banálne nízke. Ani výkup energie však neprináša žiadne veľký zisk. Pri nákladoch na výrobu veternej turbíny odhadnutej zhruba na 5 000 Kč, podľa komerčných zariadení podobného výkonu (napríklad zariadenie zo zdroja [34]) je doba návratnosti v nedohľadne. Je však nutné neuvažovať prínos len jedného zariadenia, ale uvažovať prínos energetického systému budov ako celku. Ako bolo uvedené v kapitole 1., pre budovy v mestách dáva zmysel kombinovaný systém získavania energie fotovoltaiika-vietor, a preto je nutné posudzovať systém ako celok, nie len jeho časť. Takéto komplexné ekonomické posúdenie tohto systému je však nad rámec práce. Je však jasné, že dominantnú zložku výroby energie pre budovy

bude zohrávať slnečné žiarenie a nie energia z vetra. Veterná turbína je tak len akýsi doplnok k fotovoltaickému systému pre obdobia, kedy slnko nesvieti a fúka vietor.

Je tiež nutné uviesť, že podporovať výrobu z OZE sa dá aj inak. V istých obdobiach štát umožňuje možnosť získania jednorazovej dotácie pri kúpe a prevádzke OZE. Tiež je nutné podotknúť, že ak si budova získava vlastnú energiu, stáva sa menej energeticky náročnejšou a pasívne budovy sú v dnešnej dobe zvyhodňované rôznymi daňovými úľavami. Výkupná cena energie a šetrenie zo strany nákupu energie tak nie sú jediné možnosti zvyhodnenia výroby energie z OZE pre budovy a v konečnom dôsledku záleží na aktuálnych ponukách a zvyhodneniach zo strany štátu, ako moc sa investícia do zariadení na výrobu energie z OZE vyplatí.

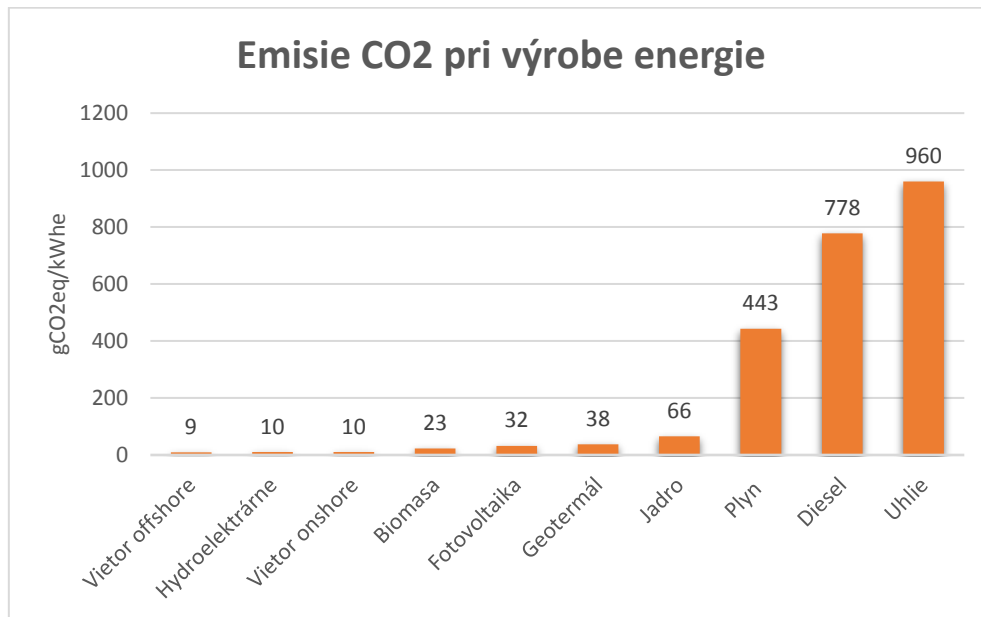
Isté vylepšenie pomeru cenný/výkon by mohlo priniesť experimentálne zapojenie veterných turbín v sérii, napojených na jeden spoločný generátor. Cena generátora tvorí väčšinu ceny celého zariadenia a teda dáva zmysel použiť len jeden generátor pre viac veterných zariadení. Zapojiť veterné turbíny do série sa dá napríklad pri použití vonkajšieho ozubenia na turbíne. Takáto veterná turbína potom môže vyzerat' nasledovne



Obr. 5.29 Experimentálna veterná turbína s vonkajším ozubením pre zapojenie turbín do série [autor]

5.3.4 Množstvo ušetreného CO₂

Množstvom ušetreného CO₂ sa myslí rozdiel množstva vyprodukovaných emisií pri výrobe energetickej jednotky z vetra a iných zdrojov. Ako však môže veterná elektrárňa vyprodukovať CO₂? Pri samotnej premene a fungovaní veternej turbíny sa žiadne emisie CO₂ neprodukujú. Emisie sa však vyprodukujú pri výrobe jednotlivých súčastí a pri doprave zariadenia na miesto inštalácie. Najväčšie množstvo emisií vyprodukuje produkcia kovových súčastí ako aj likvidácia rôznych plastových súčiastok... Fakt, že sa porovnáva množstvo vyprodukovaného CO₂ za celú životnosť energetických centráľ od výroby až po likvidáciu sa odzrkadlí v jednotke, pomocou ktorej sa zariadenia porovnávajú a tu je gCO_{2,eq}/kWh. Jedná sa o ekvivalentné množstvo gramov oxidu uhličitého pri výrobe energetickej jednotky kWh vo forme elektrickej energie. [42]



Obr. 5.30 Porovnanie emisií pri výrobe elektrickej energie [autor]

Zdrojom informácií pre obr. 5.30 bol zdroj [43]. Existuje však viacero štúdií, a čísla pre toto porovnanie vychádzali kúsok inak, je však jasné, že najčistejšie formy energie sú vodná a veterná offshore, tiež by sa dalo polemizovať o správnosti čísel pre biomasové zdroje a jadrové zdroje, záleží však na konkrétnej štúdii a hlavne konkrétnom prevedení a životnosti energetického zdroja pri stanovovaní týchto parametrov. Ekvivalentné množstvo vyprodukovaného CO₂ vzhľadom na energetickú jednotku je pre vnútrozemské veterné elektrárne $X_{CO_2}=10 \text{ gCO}_{2eq}/\text{kWh}$. Potom celkové množstvo ekvivalentne vyprodukovaných emisií pri danej výrobe energie za rok je:

$$M_{CO_2} = X_{CO_2} \cdot E_{c,5,4-3,4} = 10 \cdot 13,2 = 132 \text{ [gCO}_2\text{]} \quad (5.78)$$

Množstvo vyprodukovaných ekvivalentných emisií je len 132 gCO₂ za rok pri energetickom výťažku 13,2 kWh, čo je výrazne menej ako by to bolo v prípade uhoľných elektrární.

Vzhľadom na množstvo vyprodukovaných emisií dáva najväčší zmysel v nahradení uhoľných zdrojov tými čistejšími. Pokiaľ však daná krajina nespoľieha na uhoľné zdroje ale napríklad na jadrovú energetiku alebo vodné zdroje, investícia do výstavby veterných zdrojov nemá až taký význam.

Pre ostatné emisie ako SO_x, NO_x a emisie tuhých častíc platia podobné princípy ako pri emisiách CO₂, teda pri veternej energetike sú hlavne spojené s výrobou súčastí, dopravou a likvidáciou, pri samotnom chode veterných zariadení môže maximálne vznikáť minimálne množstvo emisií tuhých častíc. Znova platí, že v porovnaní so zdrojmi pracujúcimi s uhlím je veterná elektrárň podstatnejšie čistejšia. Konkrétne čísla spomínaných emisií uvádza zdroj [42].

5.3.5 Množstvo ušetrenej energie pri prenose

Výhodou výroby elektriny na mieste jej spotreby je aj fakt, že sa šetrí energia stratená pri prenose energie z veľkých energetických centráľ ku konečnému spotrebiteľovi. Prenos energie je účinný a veľké množstvo energie sa nestratí, šetrenie energie má však význam pri každom procese.

Zdroj [44] uvádza, že celkové straty v prenose energie od zdroja k spotrebiteľovi sú až 6% z dodávanej energie. Je však nutné tieto straty nejako kvantifikovať, samotné straty vo vysokonapäťovom prenose energie sú podľa zdroja [45] len okolo 1%. Ostatné straty v prenose vznikajú pri transformácii napätia ako aj v lokálnej nízkonapäťovej distribučnej sústave. [44]

Pri zanedbaní stát pri prenose energie od malej veternej turbíny k spotrebiteľovi v budove, potom množstvo ušetrenej energie pri lokálnej výrobe elektriny danej zo vzťahu 5.72 je

$$E_{ušetrená} = \frac{E_{c,5,4-4,4}}{\eta_{prenos}} - E_{c,5,4-4,4} = \frac{13,2}{0,94} - 13,2 = 0,84 \text{ [kWh]} \quad (5.79)$$

Dané množstvo ušetrenej energie nie je vzhľadom na rok a jednu veternú turbínu nijak závažné. Je to však zbytočne stratená energia, ktorú by konečný spotrebiteľ koniec koncov musel zaplatiť. Ak by sa budova spoliehala tiež na akumuláciu energie, bolo by nutné do rozboru tiež započítať aj energetické straty pri akumulácii energie, čo by moc nenahrávalo použitiu týchto malých energetických zdrojov.

5.3.6 Zálohovanie veterného zdroja

Zálohovaním veterného zdroja sa myslí zdroj energie, ktorý zastúpi veternú turbínu pri dňoch, kedy vietor nefúka. Obdobie bez vetra môžu robiť vrásky na čele krajinám, ktoré na vetre v značnej miere závisia, teda krajiny, ktoré majú masívne veterné parky v Severnom a Baltskom mori. Pri obdobiach bez vetra tak musia nakupovať elektriny od iných krajín, čo nemusí byť vždy možné a vzniká tak riziko, že krajina nebude mať dost energie pre bezpečný chod krajiny. Na druhej strane, v niektorých obdobiach je zase energie z vetra až príliš moc a tieto štáty musia za vývoz energia dokonca platiť.

Toto ale platí pre veľkú veternú energetiku, pre malé stroje inštalované na budovách v mestách však platí niečo iné. V kapitole 4.6.3 je vysvetlené zapojenie systému malej veternej turbíny spolu s fotovoltaickým panelom k budove. Je tam tiež vysvetlené, že pre budovy dáva zmysel také zapojenie, aby prebytok energie mohol putovať do siete na predaj alebo by putoval do takzvanej virtuálnej batérie. To isté však platí aj pri opačnom pohľade, v obdobiach nedostatku energie zo slnka alebo vetra je nutné zvýšnú energiu do budovy dodať. Energia však môže pritekať cez klasickú prípojku k sieti, nie cez súbor zariadení pripojený k panelu a k veternej turbínke. Totiž ani fotovoltaické panely spolu s veternými turbínami ani zďaleka nepokryjú energetické potreby budov a teda prípojka k sieti je bez diskusie nutná.

Ani kombinovaný systém fotovoltaika-vietor nemá taký výkon aby aj pri veľkom výskyte použitia vytvoril nejakú energetickú revolúciu takého rozmeru, že by sa mohli zatvárať klasické elektrárne. Preto si myslím, že v obdobiach kedy nesvieti slnko ani nefúka tak tento energetický systém budov bez problémov zastúpi energia vytvorená v jednej z klasických veľkých energetických centráľ (jadrové, uhoľné).

Na záver kapitoly 5.3 je ešte nutné pripomenúť to, že časť výhod a nevýhod decentralizovanej výroby elektriny respektíve výroby elektriny pre väčšiu sebestačnosť budov bolo spomenutých v kapitole 1.

5.4 Dôležité závery vyplývajúce z kapitoly 5

- Vietor v meste by sa dal považovať za veľmi premenný a nepravidelný dej. Opak je však pravdou a teda sa dá nájsť istá pravidelnosť, kedy sa vietor vo väčšine prípadov ráno dvíha a k večeru znova utícha. Cez deň hodnota rýchlosti osciluje okolo istej strednej hodnoty. Samozrejme túto pravidelnosť ovplyvňujú iste výkyvy vetra, dôležité však je, že istá pravidelnosť tu je a hlavne, že veterné počasie v mestách v noci utícha a teda netrvá celý deň.
- Zo spracovania štatistických dát pre meranie rýchlosti vetra spravených v dvoch lokalitách na kraji mesta a hlbšie v meste vyplýva že nie je veľký rozdiel medzi krajom a stredom mesta čo sa týka rýchlostí. Čo prúdenie ovplyvňuje je akákoľvek prekážka a je teda zhruba jedno koľká v rade je prekážka, rýchlosť nad ňou sa výrazne nezmení s pribúdajúcimi prekážkami. Toto tvrdenie však platí, ak sa výška prekážok nemení, vyššie prekážky vedú prúdenie značne ovplyvniť tak, že nad ďalšími nižšími prekážkami bude rýchlosť vetra výrazne nižšia. Preto by sa dalo povedať, že veterné zariadenie má význam umiestniť aj v centre mesta, pokiaľ sa v okolí pred ňou nenachádza vyššia budova v smere prevládajúceho smeru vetra- vo väčšine prípadov západného.
- Z obr. 5.12 a 5.13 vyplýva, že energetický prínos vetra vzhľadom na jeho výkon a početnosť v závislosti od rýchlosti vetra je relatívne ostrá krivka s maximom, z ktorého vyplýva návrhová rýchlosť pre zariadenie. Tiež ale z týchto obrázkov vyplýva, že nemá cenu vytvárať zariadenie, ktoré by bolo variabilné natoľko, aby mohlo zachytávať vietor o širokej škále rýchlostí. Úplne stačí, ak stroj dokáže zachytávať rýchlosti vetra blízke návrhovej. Nižšie rýchlosti vetra nemajú aj pri vysokej početnosti ich výskytu veľký energetický prínos.
- V kapitole 5.2.2 je dokázané ako veľmi sa dokáže zmeniť vstupný rýchlostný trojuholník na lopatku turbíny pri zmene vstupnej rýchlosti vetra o $\pm 50\%$. Z tohto zistenia vyplýva, že je nutné voliť profil, ktorý má dobré vlastnosti koeficientu vztlaku a odporu pri širšej škále uhlov nábehu prúdenia na profil.
- Pre lopatky turbíny bol zvolený profil SD7032-099-88, ktorý má ideálny uhol nábehu $4,75^\circ$, pričom má stále veľmi dobré vlastnosti aj pri uhloch nábehu 3° a 6° . V tabuľke 5.1 bolo dokázané, že vzhľadom na tento interval uhlov nábehu sa môže meniť rýchlosť vetra pri konštantných otáčkach (čo je dobré pre účinnosť generátoru) v rozmedzí zhruba $4,4 \pm 1$ m/s. Pričom tieto rýchlosti ešte stále majú významný energetický prínos. (táto variabilita uhlov nábehu je však závislá na polomere, pre ktorý variabilné rýchlosti zistujeme, na špici je variabilita väčšia, pri päte je nižšia)
- Veterná turbína teda bude pracovať pri ideálnych účinnostiach premien energie zo strany rotoru a generátoru pri rozmedzí rýchlostí vetra danými ideálnymi uhlami nábehu profilu, zariadenie pri týchto rýchlostiach môže pracovať pri \pm konštantných otáčkach. Zariadenie je však navrhnuté tak, aby mohlo mať aj premenné otáčky, keďže generátor nie je napojený priamo na sieť. Pri iných ako ideálnych rýchlostiach vetra bude zariadenie fungovať s otáčkami, ktoré sú odlišné od návrhových. Pri

nižších rychlostech budou otáčky nižší, klesnú od návrhových vplyvom stratou zlým uhlom nábehu tak, aby bol uhol nábehu pri novej rýchlosti vetra znovu ideálny. Pri vyšších rýchlostiach vetra otáčky vzrastú ale iba do istej miery, kedy zareaguje regulátor otáčok a zariadenia začne brzdiť, ako brzda však funguje aj jav spomenutý ako aerodynamická brzda. Je však nutné podotknúť, že pri zmene otáčok generátoru klesá jeho účinnosť voči návrhovému stavu.

- Pre zariadenia určené pre mestské budovy a umiestnené na strechy budov musí byť zariadenie bezpečne uchytené k streche. Preto bola pre turbínu zvolená len malá plocha rotoru, z čoho vyplýva malý výkon turbíny. Je však otázne do akej miery môže byť turbína pre budovy veľká. Najlepšie by bolo spojiť sa so statikom a prediskutovať tento problém s ním.
- V čom sa ale líši malá a veľká turbína a čo je veľmi dôležité je hodnota Re , pre ktoré sa zisťujú vlastnosti profilu. V takmer každej literatúre sa píše, že hodnotu Re je dobré voliť na hodnote 200 000 a že vplyv Re na presnosť výpočtu geometrie je malá. To však neplatí pre veľmi malé turbíny a pre profil SD7032-099-88 (pre bežné profily NACA to možno tak vychádza). Po prvotnom odhade a výpočte geometrie vyšlo v overení Re veľmi odlišné od odhadnutej hodnoty. Preto bolo nutné spraviť korekciu. Je to spôsobené tým, že relatívna rýchlosť prúdenia je zhruba podobná pre väčšie a menšie turbíny, menšie turbíny však majú výrazne menší rozmer tetivy. Tiež vplyv trenia na celkový odpor profilu je pri malých lopatkách väčší. Preto je pri malých veterných turbínach nutné voliť hneď na začiatku menšie Re a to po skúsenostiach s výpočtom na hodnote 100 000.
- Vplyvom odlišností medzi veľkou a malou turbínou je tiež nutné uviesť, že moc neplatí ani obr. 5.21 ktorý dáva do súvislosti rýchlobežnosť turbíny s jej účinnosťou, z obr. vyplýva, že maximum účinnosti je pri dvojlopatkovom stroji na hodnote 10, zmenou Re však vo výpočte vyšlo maximum účinnosti pri hodnote rýchlobežnosti rovnej 8. Preto je pre malé veterné turbíny nutné upraviť danú závislosť, z ktorej sa volí rýchlobežnosť turbíny, tá je však daná veľkým množstvom dát, pretože pri každej zmene rýchlobežnosti sa menia vlastnosti profilu (zmena Re). Mojm odporúčaním je však voliť rýchlobežnosť kúsok nižšiu, ako uvádzajú bežné literárne zdroje a zároveň kontrolovať pri rôznych voľbách rýchlobežnosti hodnotu konečnú Re , či je ešte zhruba správna.
- Dôležitým záverom je aj to, že takáto malá veterná turbína v energetika určite nespraví nijaký prevrat. Dokonca je na veľkom zvážení, či by sa ekonomicky vyplatila. Bez výraznej pomoci štátu by jej nákup bol pravdepodobne nie moc ekonomický.

ZÁVER

Predložená diplomová práca sa zaoberá využitím malých veterných strojov pre energetické využitie v mestskom prostredí. Danej problematike sa v detailnom ponímaní zaoberá len veľmi málo literárnych zdrojov. Väčšina zdrojov venujúcich sa veternej energetike sa zaoberá klasickými väčšími veternými turbínami s výkonom v rádoch kW alebo MW. Veterné stroje v mestách však nemôžu dosahovať až takto vysoké výkony hlavne kvôli obmedzeniu ich rozmerov. Použitie takto malých veterných strojov s výkonom v jednotkách maximálne stovkách wattov má svoje špecifiká, ktoré bolo nutné riadne a podrobne vysvetliť, tým sa zdôvodňuje rozsah práce.

Na začiatku práca pojednáva o výrobe energie v mestskom prostredí. Z tejto kapitoly vyplýva, že na výrobu elektriny v husto zastavaných oblastiach sa hodia len fotovoltaičné panely a malé veterné turbíny. Klasické energetické zdroje by v takejto malej miere nedávali zmysel z dôvodu zložitosti technológie, hospodárnosti a vypúšťaniu škodlivín priamo do prostredia, kde bývajú ľudia. Z kapitoly tiež vyplýva, že ideálne je použiť pri výrobe energie kombináciu fotovoltaičných panelov a veterných strojov z dôvodu viditeľného z obr. 1.7, ktorý poukazuje na to, že dni kedy fúka vietor a svieti slnko sú do istej miery vystriedané (v obdobiach v roku kedy viac fúka pravdepodobne menej svieti slnko).

V ďalšej časti sa práca venuje vetru samotnému. Je vysvetlený princíp jeho vzniku ako aj jednotlivé cirkulačné systémy, ktoré vznikajú pri rôznych typoch topografie povrchu. Vietor v našich geografických podmienkach ovplyvňuje v značnej miere Atlantický oceán a prechod tlakových výší a níží vzniknutých nad ním. Samozrejme, že vietor je daný aj miestnymi cirkulačnými systémami, ale prechod väčších vzduchových hmôt je dominantnejší a do väčšej miery utvára veterný charakter počasia v našich končinách. Je nutné poznamenať, že vietor u nás má väčšinou smer zo západu na východ. V kapitole sa tiež pojednáva o charakteristikách vetra, teda o charakteristikách rýchlosti vzduchu. Je ukázané, aké zložené, môže byť vyhodnocovanie všetkých charakteristík vetra, ktoré je vhodné poznať pred tým, než je v danej lokalite umiestnený veterný stroj. V prípade malých veterných strojov ale takéto vyhodnocovanie charakteristík vetra vôbec neprichádza do úvahy a konečný spotrebiteľ sa môže spoliehať len na obmedzené dáta o veterných pomeroch prípadne svoj vlastný úsudok.

Ďalšou časťou práce je štúdia špecifickosti vetra v mestských prostrediach, táto kapitola nie je vymedzená cieľmi práce, je však pre poznatky o vetre veľmi dôležitá. Literárne zdroje venujúce sa tejto problematike sa zväčša zameriavajú na prúdenie vzduchu nad mestom do istej výšky, ktorá je niekoľkonásobkom výšky budov. Pre využitie malých veterných turbín je potrebná štúdia prúdenia tesne nad domami do výšky niekoľko metrov a tak z dôvodu nedostatku informácií o tejto vrstve prúdenia bola využitá vlastná numerická simulácia prúdenia nad vybranými typmi budov a radov týchto budov. Bolo zistené, že najvhodnejší typ budov na umiestnenie veterného stroja sú budovy s horizontálnou strechou, pokiaľ sa jedná o rad takýchto budov, nie jednu vyčnievajúcu budovu. Tiež bolo zistené, že pokiaľ sa jedná o rad zhruba výškovo rovnakých budov, potom sa rýchlosť vetra v rovnakých výškach s pribúdajúcim počtom prekážok príliš nemení. Ďalej bolo zistené, že vyššie budovy vedú značne narušiť veterné podmienky pre nasledujúce nižšie budovy a to až do vzdialenosti niekoľko stoviek metrov, pričom stačí aby vyššia budova bola len dvoj či trojnásobne vyššia ako okolité budovy.

V predposlednej kapitole sa práca venuje veterným strojom vo všeobecnosti. Sú v nej odvodené fyzikálne obmedzenia týchto strojov z hľadiska účinnosti. Tiež sú v nej odvodené vzťahy potrebné pre výpočet samotnej veternej turbíny. Ďalej sa kapitola venuje konštrukcii a zapojeniu veterných turbín. Na základe vlastností veterných strojov sú tu vybraté ideálne stroje pre mestské prostredia. Ako najvhodnejšie sa javia stroje so Savoniovým rotorom a stroje vrtuľového typu. Tiež je predstavený zástupca veterných strojov, ktorý využíva na princíp svojho fungovania kmitanie, teda Karmánovu vírovú cestu, len čas však ukáže, či tieto stroje nájdu svoje uplatnenie.

Posledná kapitola práce sa zaoberá samotným návrhom veternej turbíny vrtuľového typu pre konkrétnu lokalitu. Dáta o rýchlostiach vetra boli získané z lokalít Brno-Troubsko a Brno-Žabovresky od pobočky ČHMU. Dané lokality predstavovali kraj a vnútro mesta, z charakteru veterných dní bola zvolená ako zdrojový údaj okamžitá rýchlosť vetra v čase 13:00 ako predstaviteľ využiteľnej rýchlosti vetra v priebehu celého dňa, je však otáznе, či je táto voľba najvhodnejšia. Zo štatistického spracovania dát bolo ukázané, že kraj a vnútro mesta sú si čo sa týka rýchlosti vetra a ich početností veľmi podobné a nie je medzi nimi výrazný rozdiel, čo potvrdzuje závery uvedené v tretej kapitole. Pre návrhovú rýchlosť (oveľa nižšiu ako v prípade komerčných malých veterných turbín) danú štatistickým spracovaním dát bol spravený výpočet geometrie turbíny podľa teórie lopatkovej mreže. Bolo dokázané, že počiatkové voľby parametrov turbíny sa značne líšia pre malé turbíny. Je teda pri ich návrhu voliť od začiatku nižšie Reynoldsove číslo, z ktorého sa určujú parametre profilu lopatky a to na hodnote $Re=100\,000$. Z dôvodov uvedených v kapitole je tiež vhodné voliť hneď od začiatku nižšiu rýchloběžnosť, čo sa líši od odporúčaní a to zhruba v prípade tejto práce z hodnoty $\lambda = 10$ na $\lambda = 8$. Po výpočtoch vyšiel podľa zvoleného výkonu zariadenia o hodnote $P_{el}=20\text{ W}$ výkonový súčiniteľ na hodnote $c_p=0,4925$, čo ešte nemusí byť konečná hodnota, pretože metóda TLM uvažuje len profilové straty, dá sa tak očakávať ešte nižšia účinnosť premeny zhruba o ďalších 3-5%. Samotné prínosy malej veternej turbíny nie sú vôbec úžasné a zdalo by sa, že sú aj zanedbateľné vzhľadom na ich veľkosť. Je to spôsobené tým, že výkon zariadenia je do veľkej časti obmedzený jeho plochou, ktorá v prípade umiestnenie na strechách domov a z dôvodu bezpečnosti nemôže byť priveľmi veľká a teda ani vyrobená energia a ďalšie výhody veternej turbíny sú týmto obmedzené. Je na konzultácii so statikom, do akej veľkej miery by povolil plochu veternej turbíny. Koniec koncov plocha turbíny je jediným obmedzením výkonu takéhoto zariadenia, pretože rýchlosť vetra pre danú lokalitu je daná charakterom počasia. Zariadenie o návrhovom výkone by malo byť z dôvodu malej funkčnej plochy bezpečne umiestniteľné na strechách budov. Ak by však statik povolil mať na strechách umiestnené zariadenie o väčšej ploche tak by aj prínosy takéhoto zariadenia boli omnoho väčšie a určite už nie zanedbateľné.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮV

- [1] CONRAD, W.: Die volkwirtschaftliche Bedeutung der Windkraft. Diss. Univ Frankfurt/Mein, 1925.
- [2] KAŠPAR, František. Větrné motory a elektrárny. Praha: Elektrotechnický svaz československý, 1948, Sv. 1. Elektrotechnická knihovna. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:a6afd710-f132-11e7-8226-005056827e52>
- [3] Rovnodennost'. In: Wikipedia: The free encyclopedia [online] 2020 [citované dňa 20.9.2019]. Dostupné z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Rovnodennos%C5%A5>
- [4] JEŽEK, Jan. Souřadnicové systémy na referenčních plochách.[online]. Západočeská univerzita, 2011 [citované dňa 20.9.2019]. Kapitola Zeměpisné souřadnice, ns. 24–26. Dostupné z http://home.zcu.cz/~jezekjan/mk1/3_orto_loxo.pdf
- [5] E. J. PLATE, em. Prof. Dr.-Ing, H. KIEFER, Dr.-Ing, J. WACKER, Dipl.-Ing. Wind and urban climates [online]. 2015. [citované dňa 24.2.2020]. Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610517304774>
- [6] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. Větrné motory a elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- [7] PIDWIRNY, M. Local and Regional Wind Systems. In: Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition.[online] 2006. [citované dňa 20.9.2019] Dostupné z: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7o.html>
- [8] Atmospheric lidar group. In: UMBC. [online]. [citované dňa 20.9.2019]. Dostupné z: <https://alg.umbc.edu/>
- [9] Weather and wind information [online]. 2013 [cit. 20.9.2019]. Dostupné z: <http://www.contender.it/wordpress/about-gravedona/weather-wind-information/>
- [10] NETOPIL, R., BRÁZDIL, R., DEMEK, J., PROŠEK, P. (1984): Fyzická geografie I. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 272 s.
- [11] Hustota suchého vzduchu. In: TZB-info. [online]. [citované dňa 10.3.2020]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/70-hustota-sucheho-vzduchu>
- [12] Fyzikálne vlastnosti vzduchu. In: Converter. [online]. [citované dňa 21.9.2019]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
- [13] CROME, Horst. Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení. Ostrava: HEL, 2002, 144 stran : ilustrace. ISBN 8086167194.
- [14] Mapa meteorologických stanic. In: Český hydrometeorologický ústav [online]. [citované dňa 10.3.2020]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/OS/stanice/ShowStations_CZ.html

- [15] Popisná statistika. Mathonline [online]. Brno: Ústav Matematiky, 2005 [citované dňa 10.3.2020] Dostupné z:
<http://mathonline.fme.vutbr.cz/Popisna-statistika/sc-1146-sr-1-a-139/default.aspx>
- [16] USTA, Ilhan a Ibrahim ARIK. Energy Conversion and Management: A new estimation approach based on moments for estimating Weibull parameters in wind power applications [online]. 13.3.2018, , 570-578 [citované dňa 10.3.2020]. DOI: 2018.03.033. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418302632>
- [17] MOHAMMADI, Kasra, Omid ALAVI a . Energy Conversion and Management: Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density [online]. 21.11.2015, , 322-335 [citovan dňa 10.3.2020]. DOI: 2015.11.015. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415010286?via%3Dihub>
- [18] ŠTEKL J., SOBÍŠEK B., SOKOL Z., SVOBODA J., ZELENÝ J., 1995: Perspektivy využití energie větru pro výrobu elektrické energie na území ČR. Ústav fyziky atmosféry AV ČR. Část III., 138 s., část IV. 158 s.
- [19] ŠTEKL J. a kol., 2002: Závěrečná zpráva projektu VaV320/6/00, subprojekt Větrná energie, 1. díl. Ústav fyziky atmosféry AV ČR, 117 s.
- [20] Mgr. David HANSILIAN, Mgr. Jiří HOŠEK, PhD., RNDr. Zuzana CHLÁDOVÁ, PhD., Mgr. Lukáš POP. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem I. In: TZB-info. [online] 15.4.2013. [citované dňa 16.3.2020]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i>
- [21] Mgr. David HANSILIAN, Mgr. Jiří HOŠEK, PhD., RNDr. Zuzana CHLÁDOVÁ, PhD., Mgr. Lukáš POP. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem II. In: TZB-info. [online] 22.4.2013. [citované dňa 16.3.2020]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9800-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-ii>
- [22] KADRNOŽKA, Jaroslav. Lopatkové stroje. Vyd. 1., upr. Brno: CERM, 2003, 177 s. ISBN 80-720-4297-1.
- [23] ŠKORPÍK, Jiří. Větrné turbíny a ventilátory, In: Transformační technologie, 2011-06, [last updated 2014-03]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. [citované dňa 22.3.2020] Dostupné z
<https://www.transformacni-technologie.cz/22.html>
- [24] SD7032-099-88. In: Airfoil tools [online]. [citované dňa 16.3.2020]. Dostupné z:
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=sd7032-il#polars>
- [25] HAU, E. Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics, 2006. 2. vydání. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN – 10-3-540-24240-6.
- [26] MANWELL, J, J MCGOWAN a Anthony L ROGERS. Wind energy explained: theory, design and application. 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, xii, 689 p. ISBN 04-700-1500-4.

- [27] ŠKORPÍK, Jiří. Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží, In: Transformační technologie, 2009-10, [last updated 2013-04]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. [citované dňa 22.3.2020] Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/16.html>.
- [28] Energia z vetra. In: Energoportal [online]. [citované dňa 10.4.2020]. Dostupné z: <https://www.energoportal.org/obnovitelne-zdroje/energia-z-vetra>
- [29] Small wind turbines. In: ASHUTOR ENTERPRISES PVT. LTD. [online]. [citované dňa 10.4.2020]. Dostupné z: <http://ashutor.com/Technology.html>
- [30] Savonius wind turbine. In: The renewable energy website. [online]. [citované dňa 10.4.2020]. Dostupné z: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/savonius-wind-turbines/>
- [31] Veterný mlyn stiebristo sivá. In: Kokikashop. [online]. [citované dňa 10.4.2020]. Dostupné z: <https://www.kokikashop.sk/veterny-mlyn-stiebristo-siva-245-cm-P2660/>
- [32] Darrieus turbine. In: Case western reserve university. [online]. 27.5.2015 [citované dňa 10.4.2020]. Dostupné z: <https://casewindfarmblog.weebly.com/daily-happenings/darrieus-turbine>
- [33] Schéma zapojenia veternej elektrárne. In: Kremík- internetový obchodný dom. [online]. [citované dňa 10.4.2020]. Dostupné z: <https://kremik.sk/veterne-elektrarne-china/14009-schema-zapojenia-veternej-elektrarne.html>
- [34] Veterná turbína M300. In: Solarris- energia z prírody [online]. [citované dňa 10.4.2020]. Dostupné z: <https://www.solariss.sk/Veterna-turbina-M300-12-24v-300-regulator-d686.htm?tab=description>
- [35] Karmán vortex street. In: Wikipedia: the free encyclopedia. [online]. 2020. [citované dňa 14.4.2020]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_vortex_street
- [36] Vortex bladeless- technology. In: Vortex bladeless. [online]. 2019. [citované dňa 14.4.2020]. Dostupné z: <https://vortexbladeless.com/technology-design/>
- [37] Rezonance mechanického oscilátoru. In: ELUC. [online]. [citované dňa 14.4.2020]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1658>
- [38] Vynútený kmitavý pohyb. In: e-Fyzika I. [online]. [citované dňa 14.4.2020]. Dostupné z: http://kf-lin.elf.stuba.sk/~ballo/fyzika_online/Fyzika%20I/VI%20kapitola/kmity-vlny1-7.htm
- [39] KADRNOŽKA, Jaroslav. Energie a globální oteplování: Země v proměnách při opatřování energie. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-2919-4. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:ed285250-68cb-11e4-b202-005056827e52>

- [40] Často klazené otázky. In: Energetický regulační úrad. [online]. [citované dňa 7.4.2020]. Dostupné z:
<https://www.eru.cz/poze/casto-kladene-dotazy>
- [41] Srovnání cen elektřiny 2020. In: Kurzy-cz. [online]. [citované dňa 7.4.2020]. Dostupné z:
<https://www.kurzy.cz/elektrina/srovnani-cen?page=8>
- [42] Intergovernmental Panel on Climate Change [online]. Melford, 2011 [citované dňa 7.4.2020]. ISBN 978-92-9169-131-9. Dostupné z:
https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf
- [43] SOVACOOOL, Benjamin K. Energy Policy: Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey [online]. 21-4-2008, , 2940– 2953 [citované dňa 7.4.2020]. DOI: 36 (2008) 2940– 2953. Dostupné z:
https://www.nirs.org/wp-content/uploads/climate/background/sovacool_nuclear_ghg.pdf
- [44] ŠKORPÍK, Jiří. Historie transformačních technologií, In: Transformační technologie, 2006-08, [last updated 2018-05-23]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293.[citované dňa 7.4.2020] Dostupné z
<https://www.transformacni-technologie.cz/01.html>.
- [45] Prenesená elektrina. In: Slovenská elektrizačná prenosová sústava. [online]. [citované dňa 7.4.2020]. Dostupné z:
<https://www.sepsas.sk/PrenesenaElektrina.asp?kod=537>
- [46] ŠKORPÍK, Jiří. Principy výroby elektřiny a tepla v domácnostech, In: Transformační technologie, 2010-06, [last updated 2018-02-21]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. [citované dňa 18.4.2020] Dostupné z
<https://www.transformacni-technologie.cz/10.html>.
- [47] KUŽELA ONDREJ. Priemerná spotreba elektrickej energie v domácnosti. In: Geotherm-špecialisti na vykurovanie. [online]. 15.11.2019. [citované dňa 18.4.2020]. Dostupné z:
<https://www.geotherm.sk/priemerna-spotreba-elekttrickej-energie-v-domacnosti-ako-usetrit-za-elektzinu/>
- [48] Ročné náklady na palivo a energiu pre rodinný dom. In: Slovenský plynárenský priemysel. [online]. 2017. [citované dňa 18.4.2020]. Dostupné z:
https://www.spp.sk/sk/Cds/AdminDownload/?filename=2350_Rocne_naklady_DOM_januar_2017
- [49] Priemerná spotreba elektriny v domácnosti. In: Západoslovenská distribučná a.s. [online]. 2018. [citované dňa 18.4.2020]. Dostupné z:
<https://www.vyhodnaenergia.sk/blog/126/elektrina/priemerna-spotreba-elektřiny-v-domacnosti>
- [50] ŠKORPÍK, Jiří. Sluneční záření jako zdroj energie, In: Transformační technologie, 2006-09, [last updated 2015-02]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. [citované dňa 18.4.2020] Dostupné z
<https://www.transformacni-technologie.cz/02.html>.

[51] Microgeneration. In: IAC- interseasonal heat transfer. [online]. 2020. [citované dňa 18.4.2020]. Dostupné z:
http://www.icax.co.uk/on_site_renewable_energy.html

[52] MARKVART Tomáš. Dimenzování hybridních systému fotovoltaika-vietor. In: TZB-info. [online]. 25.6.2012. [citované dňa 18.4.2020]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/8747-dimenzovani-hybridnich-systemu-fotovoltaika-vitr>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Význam	
TUV	Teplá úžitková voda	
ČHMU	Český hydrometeorologický ústav	
TLM	Teória lopatkovej mreže	
BEM	Blade element momentum theory	
OZE	Obnoviteľné zdroje energie	
ERU	Energetický regulačný úrad	
Symbol	Veličina	Jednotka
H_{slnko}	Slnčné žiarenie dopadajúce na jednotku plochy	[W/m ²]
I_0	Solárna konštanta	[W/m ²]
h_{slnko}	Výška slnka	[°]
δ	Uhol deklinácie Slnka	[°]
φ_z	Zemepisná šírka	[°]
τ	Hodinový uhol	[°]
E	Energia vo všeobecnosti	[J]
m_{vz}	Hmotnosť vzduchu	[kg]
v	Rýchlosť vo všeobecnosti (prúdenia, vzduchu)	[m/s]
ρ	Hustota vzduchu	[kg/m ³]
V	Objem	[m ³]
S	Plocha (funkčná plocha rotoru turbíny)	[m ²]
s	Dráha	[m]
P	Výkon vo všeobecnosti	[W]
t	Čas	[s]
F	Sila vo všeobecnosti	[N]
p	Tlak vo všeobecnosti (atmosférický)	[Pa]
g	Gravitačné zrýchlenie	[m/s ²]
h	Výška vo všeobecnosti (výška nad povrchom)	[m]
H	Výška prekážky	[m]
P_m	Merný výkon vzťahnutý na plochu	[W/m ²]
p_b	Barometrický tlak	[Pa]
r_{plyn}	Plynová konštanta	[J/kgK]
T	Termodynamická teplota	[K]
t_{tep}	teplota	[°C]
E_v	Energia vetru vzťahnutá na jednotkovú plochu	[J/m ²]
P_w	Výkon vetru	[W]
v_{sa}	Stredná aerodynamická rýchlosť vetru	[m/s]
$E_{\text{okamžitá}}$	Energia vetra pri okamžitej rýchlosti vetra	[J]
$E_{\text{efektívna}}$	Energia vetra pri efektívnej rýchlosti vetra	[J]
v_e	Efektívna hodnota rýchlosti vetra	[m/s]
a	Súčiniteľ Weibullového rozdelenia	[-]

b	Tvarový súčiniteľ Weibullového rozdelenia	[-]
\bar{v}	Priemerná rýchlosť vetra	[m/s]
v_{\max}	Maximálna hodnota rýchlostí vetra	[m/s]
B_{narazy}	Nárazovosť vetru	[%]
\bar{v}_h	Priemerná rýchlosť vetra v istej hladine	[m/s]
h_0	Výška, pre ktorú sú namerané hodnoty rýchlostí vetra	[m]
N	Koeficient zohľadňujúci drsnosť povchu	[-]
k_h	Korekčný súčiniteľ pre výpočet rýchlosti vetra	[-]
H_{prech}	Prechodová výška	[m]
L	Vzdialenosť	[m]
κ	Karmanova konštanta	[-]
z_0	Výška drsnosti povrchu	[m]
d_{profil}	Výška posuvu rýchlostného profilu od zeme	[m]
v_*	Šmyková rýchlosť	[m/s]
$\tau_{\text{šmyk}}$	Horizontálne šmykové napätie	[Pa]
v_0	Absolútna rýchlosť vetru (neovplyvnená rýchlosť)	[m/s]
c_x	Koeficient odporu	[-]
F_x	Odporová sila	[N]
P_z	Stratový výkon	[W]
ε	Pomer rýchlostí	[-]
η	Účinnosť	[-]
$\eta_{\text{max,odporové}}$	Maximálna teoretická účinnosť premeny energie zo vzduchu pri odporových veterných strojoch	[-]
F_a	Axiálna sila	[-]
\dot{m}	Hmotnostný prietok vzduchu	[kg/s]
v_3	Rýchlosť vetra ďaleko za veterným strojom	[m/s]
v'	Rýchlosť v rovine rotoru	[m/s]
D	Priemer rotoru	[m]
$\eta_{\text{max,vztlakové}}$	Maximálna teoretická účinnosť premeny energie zo vzduchu pri vztlakových veterných strojoch	[-]
P''	Výkon privedený k rotoru veterného stroja	[W]
η_{stroj}	Účinnosť samotného rotoru veterného stroja	[-]
S_0	Prietočná plocha vzduchu ďaleko pred rotorom stroja (vyplývajúca z prúdovej teórie)	[m ²]
P_{opt}	Optimálny výkon turbíny, pri maximálnej účinnosti premeny energie	[W]
a_{opt}	Optimálna práca turbíny	[J/kg]
w	Relatívna rýchlosť vzduchu voči pohybujúcemu sa telesu (nátoková rýchlosť)	[m/s]
c_t	Tlakový súčiniteľ	[-]

F_z	Vztlaková sila využitá pri všeobecnom popise aerodynamiky	[N]
Re	Reynoldsovo číslo	[N]
c_z	Súčiniteľ vztlaku využitý pri všeobecnom popise aerodynamiky	[-]
c	Dĺžka tetivy aerodynamického profilu	[m]
α	Uhol nábehu prúdenia na aerodynamický profil	[°]
u	Obvodová rýchlosť	[m/s]
c_a	Axiálna rýchlosť v rovine rotoru vo všeobecnosti	[m/s]
β	Uhol relatívnej rýchlosti vzhľadom na rovinu rotácie	[°]
F_u	Obvodová sila	[N]
ϑ	Kinematická viskozita vzduchu	[m ² .s ⁻¹]
St	Strouhalovo číslo	[-]
f	frekvencia	[Hz]
f_0	Vlastná frekvencia	[Hz]
ω_0	Vlastná uhlová frekvencia	[rad/s]
K	Zovšeobecnená tuhosť	[N/m]
M	Zovšeobecnená hmotnosť	[kg]
E_c	Celková energia	[J]
$E_{k,max}$	Maximálna kinetická energia	[J]
A	Amplitúda kmitajúceho systému	[m]
ω	Uhlová frekvencia	[rad/s]
v_d	Absolútna rýchlosť pohybujúcej sa dosky	[m/s]
c_p	Výkonový súčiniteľ	[-]
P_e	Elektrický príkon domácností	[W]
E_k	Kinetická energia	[J]
P_{mech}	Mechanický výkon veternej turbíny	[W]
P_d	Využitelný výkon priamočiaro sa pohybujúcej dosky	[W]
P_{rot}	Výkon spracovaný rotorom veternej turbíny	[W]
I_n	Interval rýchlostí nameraných za časové obdobie	[m/s]
n_n	Rozsah n-tého štatistického súboru	[-]
x_n	Variačný obor štatistického súboru	[m/s]
m_n	Počet tried roztriedenia n-tého štatistického súboru	[-]
$h_{tr,n}$	Dĺžka triedy roztriedeného n-tého štatistického súboru	[-]
$f(v_w)$	Hodnota Weibullovej funkcie pri rýchlosti vetra v_w	[-]
v_w	Návrhová rýchlosť vetra pre veternú turbínu	[m/s]
r_i	Polomer lopatky turbíny na i-tej sekcii lopatky	[m]
v_{wx}	Rýchlosť vetra o hodnote rovnej x	[m/s]
v_a	Axiálna rýchlosť v rovine rotoru využitá vo výpočte turbíny	[m/s]
φ	Uhol vstupnej relatívnej rýchlosti na nábežnú hranu profilu	[°]

c_y	Konkrétny súčiniteľ vztlaku využitý pri výpočte turbíny	[-]
P_{el}	Elektrický výkon veternej turbíny	[W]
η_{gen}	Účinnosť generátoru veternej turbíny	[-]
B	Počet lopatiek veterného stroja	[-]
λ	Súčiniteľ rýchlobežnosti	[-]
F_{nap}	Náporová sila pôsobiaca na turbínu	[N]
c_{FB}	Koeficient odporu samotnej veternej turbíny	[-]
v_{max}	Maximálna nameraná rýchlosť vzduchu	[m/s]
ϵ	Kĺzavý uhol	[°]
θ_p	Uhol odklonu od roviny rotácie	[°]
$\theta_{p,0}$	Uhol odklonu konca lopatky od roviny rotácie	[°]
θ_T	Uhol krútenia lopatky	[°]
δ	Uhol odklonu výslednej sily od axiálneho smeru	[°]
γ	Uhol nastavenia profilu v mreži	[°]
λ_r	Lokálna rýchlobežnosť na istom polomere lopatky	[-]
R	Polomer lopatky	[m]
N	Počet elementov lopatky	[-]
z_p	Profilové straty	[J/kg]
σ_r	Lokálna hustota lopatkovej mreže	[-]
a_{skut}	Skutočná merná práca elementu lopatky	[J/kg]
P_r	Výkon elementu lopatky	[W]
E_c	Energia dodaná zariadením za jeden rok	[J]
$t_{celkov\acute{y}}$	Celková doba funkcie zariadenia počas jedného roka	[s]
$t_{trvanie}$	Doba jedného veterného dňa	[s]
$E_{c,5,4-3,4}$	Celková energia zužitkovaná zariadením pri daných rýchlostiach za rok	[J]
$E_{c,rok}$	Celková energia ak by turbína podávala plný výkon počas celého roka	[J]
$k_{vyu\acute{z}}$	Koeficient využiteľnosti	[-]
$E_{c,rok10h}$	Celková energia zužitkovaná zariadením ak by sa počítalo len s dobou veterného dňa rovnej 10 hodín	[J]
$k_{vyu\acute{z},10h}$	Koeficient využiteľnosti pri desať-hod. veternom dni	[-]
$C_{u\acute{s}etrená}$	Merná ušetrená cena elektriny	[Kč/kWh]
$C_{v\acute{y}kupná}$	Merná výkupná cena elektriny	[Kč/kWh]
$C_{v\acute{y}kup}$	Celková výkupná cena vyrobenej elektriny	[Kč]
$C_{\acute{s}etrenie}$	Celková ušetrená cena vyrobenej elektriny	[Kč]
X_{CO_2}	Merné množstvo vyprodukovaných emisií CO ₂ pri životnom cykle veterných turbín	[g _{co2} /kWh]
M_{CO_2}	Celkové ekvivalentné množstvo vyprodukovaných emisií CO ₂ veternou turbínou za rok	[g _{co2}]
η_{prenos}	Účinnosť prenosu elektrickej energie od zdroja k spotrebiteľovi	[-]

$E_{ušetřená}$ Množstvo ušetrenej energie pri lokálnej výrobe elektriny [J]