



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

**VYUŽITÍ ENERGIE VĚTRU NA PLOCHÝCH
STŘECHÁCH BUDOV**

USE OF THE WIND ENERGY ON THE BUILDING FLAT ROOFS

TEZE

THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Eliška Tůmová

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Hirš, CSc.

BRNO 2022

ABSTRAKT

Disertační práce je zaměřena na stanovení metody, jíž je možné určit potenciál využití energie větru na plochých střechách budov. V reakci na potřebu snížit produkci emisí CO₂ a zvýšení energetické soběstačnosti je vhodné v co největší míře užít alternativní systémy dodávek energie a její obnovitelné zdroje. Bylo provedeno dlouhodobé i krátkodobé měření parametrů větru pro ověření výsledných obrazů rychlosti proudění simulace. Na základě definovaných vstupních parametrů a vyhotovené simulace je stanovena výsledná hodnota potenciálu, a to možná produkce elektrické energie pro vybrané malé větrné elektrárny na střeše zvolené budovy za jeden rok. V práci jsou stanoveny jednotlivé kroky i ověření navržené metody.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vítr, energie větru, obnovitelné zdroje, větrná elektrárna, simulace, měření, potenciál produkce elektrické energie

ABSTRACT

The PhD thesis is focused on determination of the method by which it is possible to specify the wind energy use potential on building flat roofs. In response to the need to reduce the production of CO₂ emissions and increase energy self-sufficiency, it is necessary to use alternative energy supply systems and renewable resources as much as possible. Long-term and short-term wind parameters were measured to verify the of the resulting simulation velocity flow images. Based on the defined input parameters and the completed simulation, the resulting value of the potential is determined, namely the possible production of electricity for selected small wind power plants on the roof of the selected building during one year. In the thesis the individual steps of the method are stated and the verification of the established method is determined.

KEY WORDS

Wind, wind energy, renewable resources, wind power plant, simulation, measurement, potential of electrical energy production

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TŮMOVÁ, Eliška. *Využití energie větru na plochých střechách budov*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/150740>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technických zařízení budov. Vedoucí práce Jiří Hirš.

OBSAH

1	ÚVOD.....	7
2	METODY ŘEŠENÍ.....	8
2.1	Návrh metody	8
3	STANOVENÍ POTENCIÁLU PRO VYBRANÝ OBJEKT	9
3.1	Zjištění parametrů budovy.....	9
3.2	Zjištění rychlosti větru a směru větru	9
3.3	Vytvoření modelu budovy a prostoru	12
3.4	Tvorba sítě	13
3.5	Výsledky CFD simulace.....	14
3.6	Volba typu větrné elektrárny a výšky stožáru.....	15
3.7	Počet větrných elektráren.....	17
3.8	Analýza změn rozložení větrných sil dle umístění překážky	17
3.9	Určení výsledného potenciálu.....	19
4	LIMITY POUŽITÍ MALÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	22
5	PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE.....	23
6	ZÁVĚR.....	24
7	SEZNAM VYBRANÝCH POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	25

1 ÚVOD

Dopad lidské činnosti na klimatické podmínky na naší planetě, včetně průměrných teplot, stále vzrůstá. S nutností reagovat na již probíhající globální oteplování souvisí požadavek na snížení emisí CO₂. Pro dosažení snížení emisí CO₂ je potřebné navýšit úspory energie, zabývat se maximální efektivitou produkce energie, využitím obnovitelných zdrojů energie i produkcí elektrické energie na místě její potřeby tak, aby se eliminovaly ztráty přenosem. Evropská unie i OSN se reagují svojí politikou a strategií na globální oteplování např. Kjótským protokolem. EU se daří závazky stanovené v Kjótském protokolu plnit, aniž by v EU došlo ke snížení spotřeby obyvatelstva. Je však nutné v uvozovkách přivřít oči nad emisemi způsobenými produkcí dovezených výrobků z rozvojových zemí, které Kjótský protokol neratifikovaly. [3]

Obnovitelné zdroje energie, které jsou stále dostupné i v zastavěných oblastech ve své základní podobě jsou energie ze slunce a větru. Sluneční záření se již dnes využívá, ale energie větru je oproti tomu v pozadí. Malé větrné elektrárny jsou však velmi zajímavé i vzhledem k jejich životního cyklu. Zatímco fotovoltaické panely jsou, co se týče ekologické likvidace problematické, malé větrné elektrárny lze díky druhu použitých materiálů plně recyklovat.

U obytných budov se pro topení, chlazení a osvětlení v technologicky vyspělých státech stále spotřebuje přibližně 40 % veškeré produkované energie [3]. Je třeba nabídnout ucelená řešení.

Disertační práce se zabývá stanovením metody pro určení potenciálu využití větrné energie na střechách budov s plochou střechou, jehož stanovení má za cíl přispět k možnosti ještě více využívat obnovitelný zdroj energie vítr.

2 METODY ŘEŠENÍ

Metody řešení jsou volené teoretické, simulační a experimentální.

2.1 NÁVRH METODY

Jako vhodné řešení určení potenciálu využití větrné energie na střechách budov v zastavěné oblasti se na základě níže uvedených skutečností jeví jako nejvhodnější metoda s následujícím postupem:

1. Zjištění parametrů budovy a okolí
2. Získání dat pro proudění větru z akademie věd ČR, model Medard (obsahuje data ve formě větrné růžice v m/s, distribuční charakteristiku rychlostí větru – četnosti, a to ve výšce 10 m)
3. Vytvoření základního modelu budovy umístěného v terénu (určení dimenzí volného prostoru okolo budovy na základě vzdáleností, které nedeformují proudění větru kolem budovy)
4. Přenesení modelu do CFD prostředí (vytvoření kvalitní sítě)
5. CFD simulace proudění v okolí střechy budovy (stanovení okrajových podmínek, export výsledků)
6. Výběr typu větrné elektrárny dle k ní náležející křivky produkce elektrické energie
7. Stanovení počtu umístitelných větrných elektráren (na základě volného prostoru na střeše, její únosnosti, m² nutných pro umístění 1 větrné elektrárny),
8. Analýza změn rozložení větrných sil dle umístění překážky
9. Stanovení potenciálu

Návrh těchto kroků byl uskutečněn na základě výsledků níže uvedených měření a provedených simulací.

3 STANOVENÍ POTENCIÁLU PRO VYBRANÝ OBJEKT

3.1 ZJIŠTĚNÍ PARAMETRŮ BUDOVY

Potenciál využití energie větru je zjišťován pro plochou střechu administrativní budovy P4 stojící v areálu AdMaS v Brně na Purkyňově ulici.



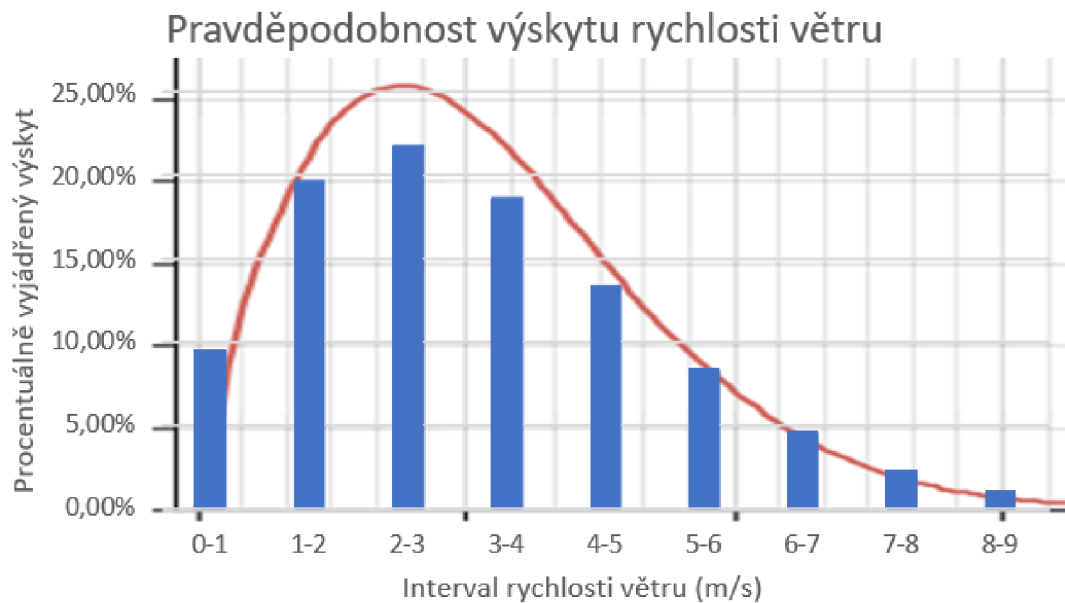
Obr. 1 Budova P4 v areálu

Tab. 1 Důležité parametry budovy, určující simulaci:

Základní vnější rozměry:	Výška:	11,35 m
	Délka:	81 m
	Šířka:	15 m
GPS souřadnice	49.235200N	16.5705000E
Orientace na světové strany:	Čelní strana budovy:	SZ

3.2 ZJIŠTĚNÍ RYCHLOSTI VĚTRU A SMĚRU VĚTRU

Zjištění dat proudění větru z akademie věd ČR dle GPS souřadnic budovy z modelu Medard (větrná růžice s m/s, distribuční charakteristika rychlostí větru – četnosti, ve výšce 10 m).



Obr. 2 Zastoupení rychlostních skupin (intervalů) proložené grafem hustoty pravděpodobnosti

Tab. 2 Rozdělení pravděpodobností rychlostí proudění vzduchu pro umístění budovy P4

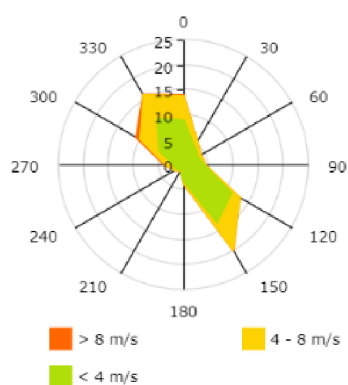
Interval rychlosti větru m/s	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Sloupec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pravděpodobnost výskytu [%]	9,5 1	19, 72	21, 82	18, 70	13, 43	8,3 7	4,6 0	2,2 5	0,9 9	0,4 0	0,1 4	0,0 5

zem. šířka: 49°14'6.270"N
zem. délka: 16°34'13.858"E

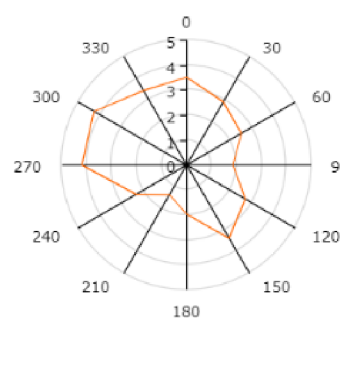
výška nad zemí (střed rotoru): 10 m
průměr rotoru: 5 m
maximální výkon: 5000 W

směr větru [°]	relativní četnost				prům. rychlost [m/s]	parametry Weibull		výroba energie	
	vše	0-4 m/s	4-8 m/s	> 8 m/s		A [m/s]	k	roční [kWh]	relativně
0	14.1%	9.02%	4.85%	0.23%	3.51	3.96	2.01	337.0	15.70%
30	5.5%	4.34%	1.15%	0.00%	2.92	3.29	2.29	54.1	2.52%
60	4.1%	3.33%	0.72%	0.05%	2.53	2.77	1.40	82.2	3.83%
90	4.4%	4.18%	0.22%	0.00%	1.86	2.08	1.68	13.4	0.62%
120	13.0%	11.12%	1.88%	0.00%	2.71	3.05	2.44	88.0	4.10%
150	19.9%	13.36%	6.45%	0.09%	3.38	3.82	2.27	323.5	15.07%
180	3.9%	3.45%	0.42%	0.03%	1.96	2.06	1.16	53.9	2.51%
210	1.4%	1.35%	0.05%	0.00%	1.37	1.45	1.18	3.6	0.17%
240	2.2%	1.88%	0.31%	0.01%	2.34	2.60	1.54	24.6	1.15%
270	4.0%	2.06%	1.69%	0.25%	4.19	4.73	1.93	184.9	8.61%
300	11.1%	5.71%	4.45%	0.94%	4.28	4.81	1.77	689.6	32.12%
330	16.4%	10.75%	5.54%	0.11%	3.44	3.89	2.24	291.9	13.60%
celkem	100%	70.56%	27.72%	1.72%	3.22	3.62	1.79	2146.9	100%

Rozdělení směrů větru (%)



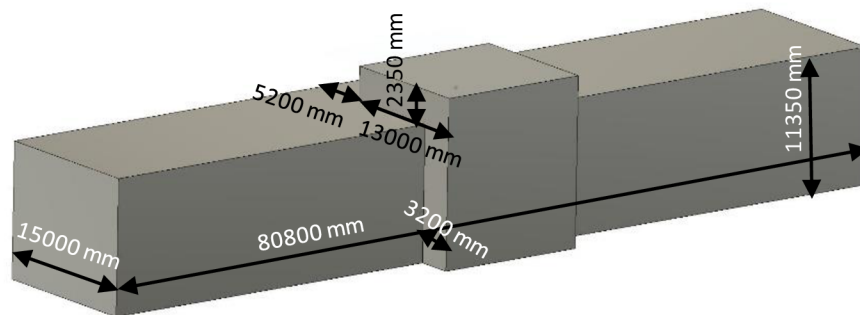
Průměrná rychlost větru (m/s)



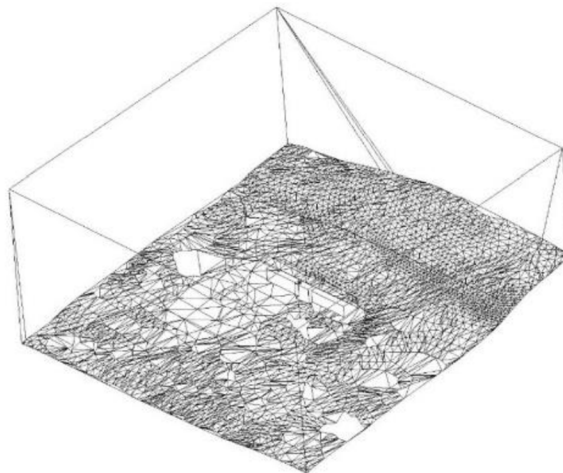
Rozdělení proudění vzduchu na základě parametrů A a k a průměrné rychlosti proudění podle Weibullova rozdělení je uveden pro budovu P4 v tabulce Tab. 2, převažující směr větru (pro ustanovení simulace, zejména stěny prostoru pro vstup (inlet) and výstup (outlet)) je 330°, dle toho je stanovena stěna prostoru – vstup simulace (kolmá na tento směr)

3.3 VYTVOŘENÍ MODELU BUDOVY A PROSTORU

Třetím krokem je vytvoření modelu. V prostředí podporujícím stažení katastrálních map (zvolen REVIT s doplňkem BIM TechTools. Je vytvořen terén. Dále jsou v Autocadu sloučeny linie terénu. Následně je v softwaru Fusion 360 vytvořena budova a prostor okolo ní. Tvorba modelu byla řízena základními zásadami, které jsou uvedeny v Tab. 3 Základní zásady pro tvorbu prostoru kolem budovy a užití hodnoty spolu s rozepsanými zásadami jsou v této tabulce uvedeny konkrétně pro model budovy s prostorem užití hodnoty.



Obr. 3 Základní rozměry budov



Obr. 4 Model budovy a prostoru z programu Fusion 360

Tab. 3 Základní zásady pro tvorbu prostoru kolem budovy a užité hodnoty

		(m)	v modelu
Výška budovy		$H_{budovy} =$	11,35 m
Minimální výška prostoru	$H_{min} = 10 \times h_{budovy} =$	113,5	120 m
Minimální vzdálenost od vtoku k budově	$L_u = 5 \times h_{budovy} =$	56,75	60 m
Minimální vzdálenost k výtoku od budovy	$L_{down} = 3 \times h_{budovy} =$	34,05	40 m
Orientace stěny vstupu okolního proudění do prostoru – dle převažujícího směru proudění vzduchu			330°

3.4 TVORBA SÍŤE

Bod 4 metody obsahuje přenesení modelu ve formátu ACIS (.acis) do CFD prostředí s vytvořením kvalitní sítě hodnocení jednotlivých údajů k síti použité pro simulaci proudění jsou uvedeny níže v tabulce Tab. 4 Hodnocení kvality sítě.

Tab. 4 Hodnocení kvality sítě

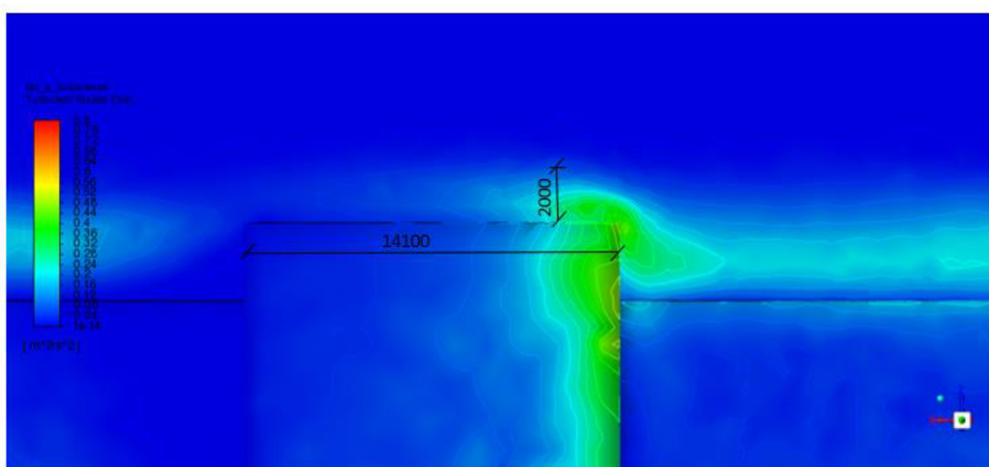
Prvky sítě	tetrahedrální
Počet uzlů	126144
Počet buněk	722506
Maximální velikost buňky	3 m
Šikmost (0 - velmi dobrá, nad 0,9 - špatná)	Minimální hodnota 0,0006346 Maximální hodnota 0,89783 Průměrná hodnota 0,25603
Ortogonální kvalita (1 - velmi dobrá, pod 0,1 - špatná)	Minimální hodnota 0,21969

	Maximální hodnota 0,99593 Průměrná hodnota 0,84127
Zjemnění síť na povrchu budovy a kolem ní (nominální velikost):	1 m
Poměr růstu buněk	1.2

3.5 VÝSLEDKY CFD SIMULACE

V pátém kroku byly provedeny simulace proudění větru pro okolí střechy budovy za stanovených okrajových podmínek, získání výsledků a export výsledků.

Nejdříve byla vyhodnocena výška, ve které je proudění laminární. Pro budovu P4 je laminární proudění v bodě, kde bylo prováděno i experimentální měření s jistotou laminární od výšky 2 m na střechou pro nejčastěji zastoupenou rychlost větru, a to na horní hranici intervalu, pro hodnotu rychlosti větru 3 m/s.



Obr. 5 Kinetická energie turbulence pro nejzastoupenější interval rychlosti proudění vzduchu

Poté byly na základě rozdělení do jednotlivých intervalů stanoveny vstupní rychlosti do simulace (velocity-inlet) a vyhodnocena rychlost proudění v dané výšce nad střechou budovy. Výsledné rychlosti proudění větru nad střechou budovy jsou pro jednotlivé intervaly spolu s pravděpodobností výskytu dle Weibullova rozdělení jsou uvedeny níže v tabulce Tab. 5 níže:

Tab. 5 Výsledky pro jednotlivé intervaly rychlosti

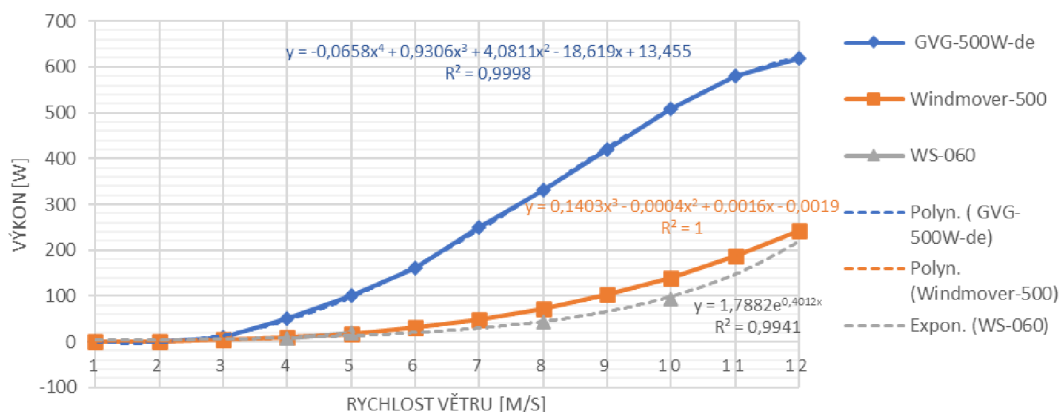
Rozsah intervalu v m/s	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
č. intervalu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zastoupení intervalu v %	9,51	19,72	21,82	18,70	13,43	8,37	4,60	2,25	0,99	0,40	0,14	0,05
Vstupní rychlost do simulace v m/s	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5
Rychlost proudění nad střechou ve výšce 2 m v m/s	0,51	1,56	2,56	3,58	4,61	5,63	6,36	7,34	8,32	9,30	10,28	11,26

3.6 VOLBA TYPU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A VÝŠKY STOŽÁRU

Za účelem výběru větrné elektrárny vhodné pro umístění na střeše objektu byly vybrány tři malé větrné elektrárny od různých výrobců. Všichni tito výrobci garantují nízkou rozběhovou rychlost a poskytují potenciálnímu kupci větrné elektrárny parametry výkonu při stanovených rychlostech větru. Parametry vybraných větrných elektráren GVG-500W-de, Windmover-500 a WS-060 lze nalézt v přílohách dizertační práce P1-P3.

Výběr typu větrné elektrárny dle k linií náležející křivky produkce elektrické energie. Výška stožáru je volena tak, aby bylo dosaženo výšky neovlivněné tvarem budovy (tj. oblasti s laminárním prouděním vzduchu a vyšší rychlostí proudění vzduchu). V prvním kole ověřování byla zvolena výška stožáru s větrnou elektrárnou dohromady a to 2,5 m.

KŘIVKY VÝKONU MALÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN



Obr. 6 Křivky výkonu vybraných větrných elektráren

Dále jsou body výkonu větrných elektráren proloženy, nejvhodnější spojnicí trendu. Výsledné vztahy pro spojnicí trendu jednotlivých větrných elektráren spolu s hodnotou spolehlivosti R jsou uvedeny výše na Obr. 6 Křivky výkonu vybraných větrných elektráren.

		
Obr. 7 GVG-500W-de	Obr. 8 Windmover-500	Obr. 9 WS-0,60 city

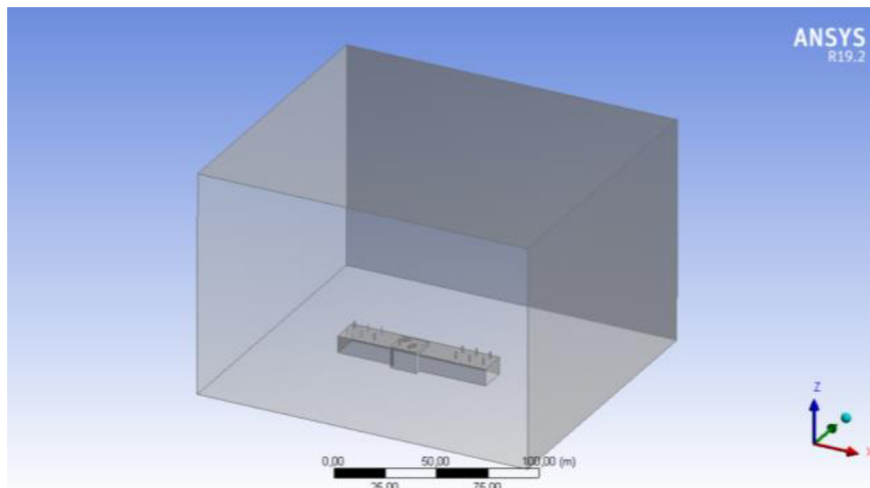
Na základě křivek výkonu byla jako nejlepší vybrána větrná elektrárna GVG-500W-de.

3.7 POČET VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Stanovení počtu umístitelných větrných elektráren na základě volného prostoru na střeše, její únosnosti, m^2 nutných pro umístění 1 větrné elektrárny) a předchozího výsledku proudění na střeše budovy (do oblastí s výrazně nižší rychlostí proudění nemá smysl větrnou elektrárnu umísťovat) Výsledný počet větrných elektráren na střeše také podléhá dalšímu uvedenému kroku 3.8 Analýza změn rozložení větrných sil dle umístění překážky. V prvním návrhu bylo navrženo celkem 13 větrných elektráren jejich rozložení viz. Obr. 10 Rozmístění větrných elektráren

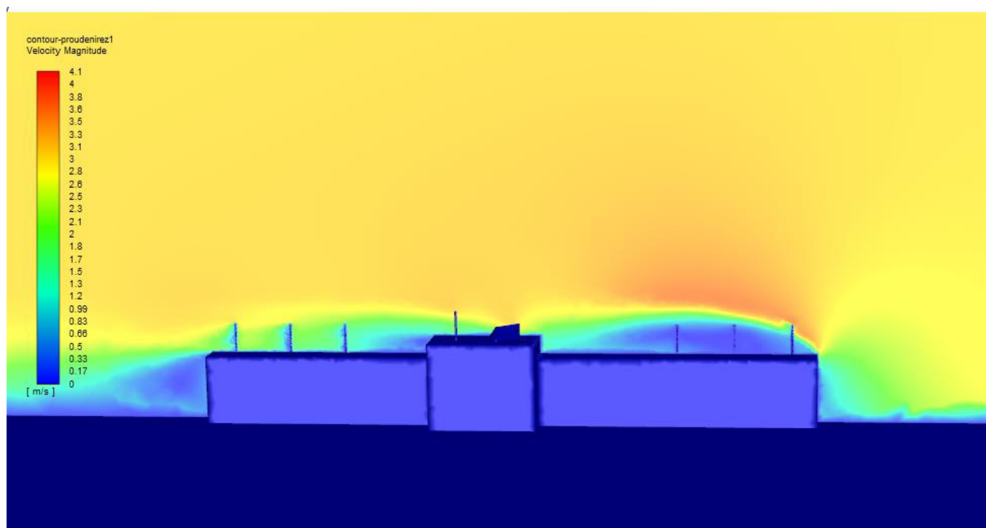
3.8 ANALÝZA ZMĚN ROZLOŽENÍ VĚTRNÝCH SIL DLE UMÍSTĚNÍ PŘEKÁŽKY

Pro ověření proudění na střeše, a toho, že mezi jednotlivými elektrárnami je mezera s lineárně proudícím vzduchem, který není ovlivněn blízkostí další větrné elektrárny či dalších prvků na střeše budovy. Pokud je již střecha osázena jinými prvky, které mohou výrazně ovlivňovat proudění vzduchu nad střechou jsou také zahrnuty do simulace. V tomto případě jsou takovými výraznými prvky fotovoltaické panely. Zjednodušený model střechy s osazenými překážkami a větrnými elektrárnami je k vidění níže na Obr. 10 Rozmístění větrných elektráren na střeše.

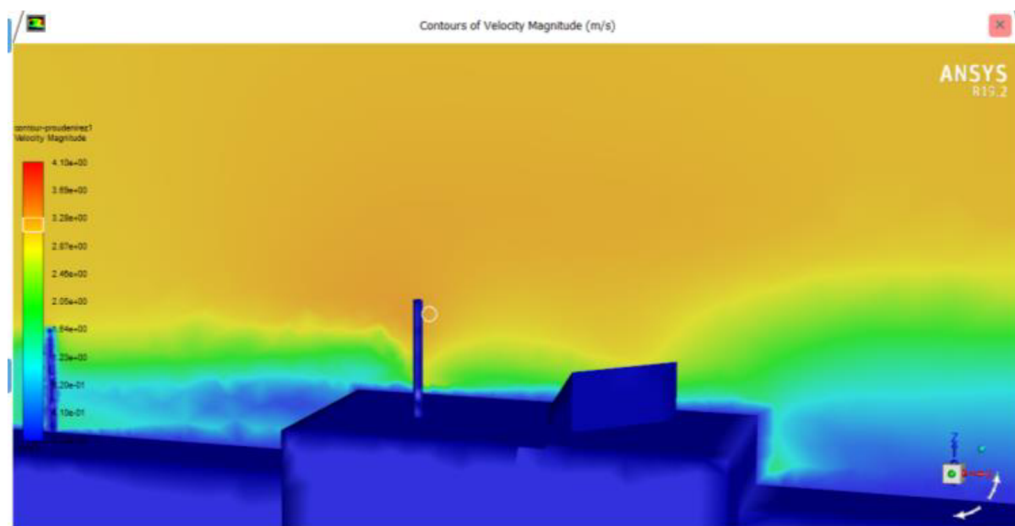


Obr. 10 Rozmístění větrných elektráren na střeše

Dále je ukázáno na Obr. 11 Obráz rychlosti proudění větru se střechou a stožáry o výšce 4200 mm proudění s řezem budovy v polovině, na které, je vidět, že výška, do které jsou větrné elektrárny na pravém křídle osazeny není vhodná. Na levém křídle je vidět, že se je prodění za stožárem ovlivněno jeho jednotlivými kusy. Stožár umístěný uprostřed na zvýšené stříšce se jeví jako dostatečně vysoký viz Obr. 12 Obráz proudění kolem stožáru o výšce 4200 m na zvýšené stříšce.

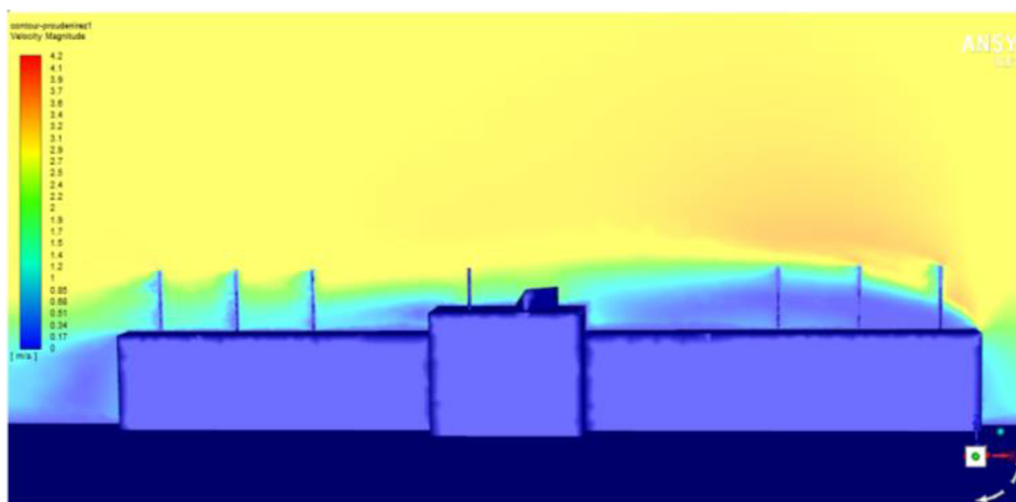


Obr. 11 Obráz rychlosti proudění větru se střechou a stožáry o výšce 4200 mm



Obr. 12 Obráz proudění kolem stožáru o výšce 4200 m na zvýšené stříšce

Proto byly stožáry k větrným elektrárnám umístěným na bocích zvýšeny na 5700 mm a provedena další simulace.



Obr. 13 Výška stožárů s větrnou elektrárnou na bočních stranách budovy 5700 mm s prouděním kolem budovy

Takto nahusto osazené větrné elektrárny na bocích budovy výrazně ovlivňují proudění pro dále osazené elektrárny. Kroky 6. až 8. se opakují, dokud není nalezeno jistoty, že se větrné elektrárny neovlivňují. Z tohoto potvrdíme počet větrných elektráren, kterými je možné budovu osadit. V tomto konkrétním případě byla analýza rozložení větrných sil kolem stožárů po dvou kolech simulací ukončena a bylo rozhodnuto dokončit určení potenciálu s umístěním 1 větrné elektrárny o výšce 4200 mm na zvýšenou část střechy uprostřed budovy.

3.9 URČENÍ VÝSLEDNÉHO POTENCIÁLU

Výkon je vypočítán dle vztahu (47), který je uveden již na Obr. 6 Křivky výkonu vybraných větrných elektráren. Na tomto obrázku uvedené jednotlivé body výkonu dle rychlosti jsou získány od výrobců a pro účel výpočtu jsou body proloženy polynomiální křivkou. y ve vztahu (47) odpovídá výkonu ve W a x je rovno rychlosti v m/s. Výsledný výkon pro jednotlivé intervaly lze nalézt v tabulce Tab. 6 Výpočet výkonu větrné elektrárny GW-500-de pro jednotlivé intervaly rychlosti výše.

Tab. 6 Výpočet výkonu větrné elektrárny GW-500-de pro jednotlivé intervaly rychlosti

Rozsah intervalu	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
č. intervalu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zastoupení intervalu v %	9,51	19,72	21,82	18,70	13,43	8,37	4,60	2,25	0,99	0,40	0,14	0,05
Rychlost proudění nad střechou ve výšce 2 m (střední hodnota zjištěného intervalu) v m/s	0,51	1,56	2,56	3,58	4,61	5,63	6,36	7,34	8,32	9,30	10,28	11,26
Výkon (y) ve W při zastoupení jedné třídy	0	0	5,31	31,13	75,72	138,13	191,97	273,71	361,66	449,45	529,28	591,87
Výkon (y) W při procentuálním zastoupením intervalu	0	0	1,16	5,82	10,17	11,56	8,83	6,16	3,58	1,80	0,74	0,30

$$y = -0,0658x^4 + 0,9306x^3 + 4,0811x^2 - 18,619x + 13,455, \quad (47)$$

při $R^2 = 0,9998$

Procentuální zastoupení intervalu se vztahuje k zastoupení rychlosti větru během roku z výkonu zpracovaného ve W poníženým o jeho procentuální zastoupení během roku pak dostaneme hodnotu obsahující množství energie vyprodukované za rok P_{1Y} pro navržený počet n větrných elektráren. Pro budovu P4 bylo určeno:

$$P_{1Y} = n \cdot P_{1E} =$$

$$P_{1Y,P4} = 439,01 \text{ kWh}$$

Výsledné množství produkovatelné elektrické energie z energie větru za rok, které je výslednou hodnotou potenciálu pro budovu P4 činí při zvolené elektrárně GW-500-de 439,01 kWh. Závěrem lze ke stanovení potenciálu říci, že konkrétně zde, na referenční budově P4 by se jevil jako vhodné uvolnit zvýšenou část střechy pouze pro osazení větrnými elektrárnami a

fotovoltaické panely umístit na boky budovy. Pokud by se tak majitel budovy rozhodl učinit nyní, kdy jsou panely již osazeny, znamenalo by to zvýšené náklady, ale bylo by možné dále analyzovat a patrně i navýšit potenciál využitelnosti větrné energie na střeše budovy.

4 LIMITY POUŽITÍ MALÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Návrh osazení konkrétními malými větrnými elektrárnami podléhá kontrole statika pro únosnost střechy a kontrole hluku a vibrací. Kontrola hluku a vibrací je však spíše záležitostí technologického vývoje a není předmětem této práce, přesto je nutné jejich dopad je krátce uvést.

Vibrace malých větrných elektráren mohou být způsobeny mechanickými silami a silami souvisejícími s větrem, přičemž je třeba říct, že tyto síly mohou i vybuzovat vlastní frekvence u svých součástí (stožár, generátor, list rotoru) a vést tak k rezonančním vibracím a následnému poškození konstrukce díky předčasné únavě materiálu. Zejména u rodinných domů to může někdy znamenat, že malé větrné elektrárny nelze instalovat nebo je nelze instalovat požadovaným způsobem z důvodu statického přetížení po zamýšleném umístění větrné elektrárny. Malé větrných turbíny namontované na budovách mohou také nepříznivě působit na osoby pohybující se uvnitř a v blízkosti budovy s instalovanou větrnou elektrárnou, a to emisemi hluku, infrazvukem i hlukem a vibracemi šířenými. Dále je nutné pamatovat na to, že výkon větrné elektrárny může v našem klimatickém pásmu ovlivnit námraza [12].

5 PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

Praktický přínos práce

Hlavní praktickým přínosem práce je možnost predikce využitelnosti střechy k produkci elektrické energie z energie větru již ve fázi návrhu budovy. Pro budovy již postavené je hlavním přínosem navržené metody zkrácení času potřebného ke zjištění využitelnosti střechy pro osazení větrnými elektrárnami, aniž je nutná realizace dlouhodobého měření rychlosti větru anemometry na střeše. Zároveň je vhodně posouzena výška i místo, do které by měla být větrná elektrárna umístěna. Tím, že není nutné dlouhodobé měření metoda také eliminuje možnost chybného osazení měřidel. Zároveň je možné dopředu eliminovat nevhodné rozmístění prvků na střeše budovy, které mohou bránit optimálnímu rozmístění větrných elektráren a snižují tak potenciál využitelnosti i větrné energie na střeše budovy. Díky tomu, že lze metodu využít již při návrhu budovy lze v této fázi přizpůsobit dopředu nosné konstrukce pro instalaci větrných elektráren. Všechny zmíněné body vedou k ekonomické úspoře.

Pedagogický přínos

Metoda je svým návrhem motivuje studenty k využívání moderních technologií, je praktickým využitím CFD simulací a ukazuje na aplikovatelnost při studiu nabytých znalostí. Rozšiřuje pro studenty technických zařízení budov oblast používání CFD simulací z interiéru na exteriér. Metoda může být využita v rámci předmětů zabývajících se obnovitelnými zdroji energie. Tato práce také může sloužit jako podklad pro diplomové práce, které ji mohou dále rozvíjet, nabízí se např. podrobnější hodnocení proudění z jiného směru na budovu či srovnání proudění v okolí budovy, která je umístěna v terénu s reliéfem a proudění v okolí budovy s terénem nahrazeným rovnou plochou, což se nabízí jako zjednodušení navržené metody pro oblasti, kde by nebyly dostupné 3D vrstevnice povrchu tak, jak je to možné v České republice. Předpokládá se použitelnost metody také pro šikmé střechy, což je by mělo být předmětem dalšího ověření.

Teoretický přínos práce

Metoda nabízí spojení různých zdrojů dat, a to konkrétně reliéfu budovy, tvaru budovy a simulace proudění. Jsou srovnána data z dlouhodobého ročního měření a údajů z predikčního modelu. Predikovaná data proudění větru pro volný terén jsou díky simulaci využita k získání hodnot rychlosti proudění větru kolem budovy.

6 ZÁVĚR

Na základě výsledné rychlosti a obrazu proudění kolem střechy budovy je s pomocí četnosti jednotlivých rychlostí proudění větru nad střechou budovy vyhodnocen její potenciál pro produkci elektrické energie s vybraným typem malé větrné elektrárny z energie větru. Potenciál je závislý zejména na rychlosti proudění vzduchu v dané oblasti

Výsledné poznatky, zejména zpracované snímky polí proudění větru, lze využít k návrhu umístění větrných elektráren na střeše budovy a přispět k rozšíření mikrosítí a energetické soběstačnosti budov.

Předností metody je, že takto odpadá nutnost dlouhodobého měření na střeše budovy, potenciál je možné stanovit pro mediánovou hodnotu rychlosti proudění vzduchu v dané oblasti. Zároveň je vhodně posouzena výška i místo, do které by měla být větrná elektrárna umístěna. Zároveň je nutné říct, že se nabízí zkoumání srovnání simulace proudění vzduchu v okolí střechy budovy, pokud nebude profil terénu zohledňovat jeho skutečný tvar, ale bude rovnou plochou, což se nabízí jako zjednodušení metody pro oblasti, kde by nebyly dostupné 3d vrstevnice povrchu, tak jak je to možné v České republice. Zkoumán byl proud větru v jednom převažujícím směru s modelem turbulence RANS $k-\epsilon$. Předpokládá se platnost také pro šikmé střechy, což je by mělo být předmětem dalšího ověření.

7 SEZNAM VYBRANÝCH POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Státní energetická koncepce České republiky* [online], 2014. Praha: Ministerstvo obchodu a průmyslu [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2016/12/Statni-energeticka-koncepce-_2015_.pdf
- [2] *Climate Change 2013 The Physical Science Basis* [online], 2013. USA: Cambridge University Press [cit. 2018-03-07]. ISBN 978-1-107-05799-1. Dostupné z: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
- [3] DAVIS, S. J. a K. CALDEIRA, 2010. Consumption-based accounting of CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 107(12), 5687-5692. DOI: 10.1073/pnas.0906974107. ISSN 0027-8424. Dostupné také z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0906974107>
- [4] VLČEK, Petr, 2013. Modelování turbulentního proudění. In: *Procesní technika 2013* [online]. Praha: České vysoké učení technické, s. 1-21 [cit. 2018-03-10]. ISBN 978-80-01-05285-3. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>
- [5] KOZUBKOVÁ, Milada a Sylva DRÁBKOVÁ, 2003. *Numerické modelování proudění*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. ISBN 80-248-0525-1.
- [6] JOSHI, Jyeshtharaj B., Nandkishor K. NERE, Chinmay V. RANE, B. N. MURTHY, Channamallikarjun S. MATHPATI, Ashwin W. PATWARDHAN a Vivek V. RANADE, 2011. CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. Part I. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* [online]. **89**(1), 23-82 [cit. 2018-04-

- 20]. DOI: 10.1002/cjce.20446. ISSN 00084034. Dostupné z:
<http://doi.wiley.com/10.1002/cjce.20446>
- [7] VLČEK, Josef, 2014. *Vliv turbulentního modelu na simulace proudění vzduchu v okolí průtokoměru* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/31294>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soňa Šedivá.
- [8] BLEJCHAŘ, Tomáš. Turbulence modelového proudění - CFX: učební text [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2018-04-24]. ISBN 978-80-248-2606-6.
- [9] PODSTATA VĚTRU, 2018. ČEZ [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/04/podstata_3.html
- [10] Strom aus Klein-Windkraftanlagen von ÖKO-Energie, 2007. *Oeko-energie.de* [online]. Thomas Oberholz [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.oeko-energie.de/produkte/windkraft/index.php>
- [11] RAGHEB, Magdi, *WIND ENERGY CONVERSION THEORY, BETZ EQUATION* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Energy%20Conversion%20Theory%20Betz%20Equation..pdf>
- [12] SmallWindPower@Home - Evaluierung der Auswirkungen von gebäudemontierten Kleinwindenergieanlagen auf Performance, Personen, Gebäude und Umgebung.
In: *Nachhaltigwirtschaften.at* [online]. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2021 [cit. 2022-09-14].
Dostupné z:

https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2022-10-small-wind-power-home.pdf

- [13] ANSYS [online], 2018. USA [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/turbulence-modeling>
- [14] Aplikace Vítr. *Institute of Atmospheric Physics CAS* [online]. CZ: Strategie AV21, 2016 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/#>
- [15] WRF - Weather Research & Forecasting Model. *National Center for Atmospheric Research, Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory* [online]. Boulder, CO: NCAR, 2022 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
- [16] HANSLIAN, David. Větrné podmínky pro malé větrné elektrárny. *TZB-info* [online]. Topinfo, 2012 [cit. 2022-02-16]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/8358-vetrne-podminky-pro-male-vetrne-elektrarny>
- [17] SAYIGH, A. A. M. *Comprehensive renewable energy*. Amsterdam: Elsevier, [2012]. ISBN 00-809-7167-9. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/wind-measurement>
- [18] WIZELIUS, T. Design and Implementation of a Wind Power Project. *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier, 2012, 2012, **2**, 391-430. ISBN 9780080878737. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-087872-0.00215-8
- [19] Measured climatic data, Enki o.p.s.: Web viewer of measured data. *FMWEB (CloudFM 2): Web viewer of measured data* [online]. Třeboň: ENKI, 2012 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://stanice.fiedler-magr.cz/index2.php>
- [20] MATTAR, Sarah Jamal, Mohammad Reza KAVIAN NEZHAD, Michael VERSTEEGE, Carlos F. LANGE a Brian A. FLECK. Validation Process for

Rooftop Wind Regime CFD Model in Complex Urban Environment Using an Experimental Measurement Campaign. *Energies* [online]. 2021, **14**(9) [cit. 2022-09-15]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14092497

[21] BLOCKEN, Bert. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment* [online]. 2015, **91**, 219-245 [cit. 2022-02-26]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2015.02.015

[22] WIERINGA, Jon. Updating the Davenport roughness classification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1992, **41**(1-3), 357-368. ISSN 01676105. Dostupné z: doi:10.1016/0167-6105(92)90434-C