

# **Analiza ustreznosti lokacije vrh Kržišča za namestitev vetrne turbine**

Avtor prispevka:

JURIJ ČADEŽ, GORENJSKE ELEKTRARNE, D. O. O., [jurij.cadez@gorenjske-elektrarne.si](mailto:jurij.cadez@gorenjske-elektrarne.si)

## **Izvleček**

Kržišče je 1.658 m visok hrib poleg Krvavca. Za določitev ustreznosti lokacije smo preverili okoljske in tehnično-ekonomske vidike umestitve potencialne vetrne elektrarne v prostor. Bistven sestavni del raziskovalnega dela je izračun energetskega potenciala vetra na tej lokaciji. Izvajanje meritev je v razgibanem srednjegorskem okolju z ostrimi vremenskimi pogoji vse prej kot enostavno. Izveden izračun je, ob upoštevanju nekaterih predpostavk, pokazal zmerno primernost lokacije za izrabo vetrne energije. Za dokončen izračun energetskega potenciala vetra na lokaciji Kržišče bi bilo treba izvesti meritev vertikalnega profila vetra, ki pove, kako se hitrost vetra z oddaljevanjem od tal povečuje. Pri predpostavki, da je hitrost vetra na višini osi vetrnice zgolj za 6 % višja od izmerjene hitrosti, znaša interna stopnja donosnosti (ISD) 5,08 %. Alternativni izračun za 22 % povečanje hitrosti vetra, ki bi veljal v ravninskem svetu, pa nam rezultat izboljša na 9 %.

Ključne besede: vetrna elektrarna, energetski potencial vetra, meritve, ustreznost lokacije

# **ANALYSIS OF THE ADEQUACY OF THE KRŽIŠČE PEAK AS A WIND TURBINE INSTALLATION SITE**

## **Summary**

Kržišče is a hill next to Krvavec that is 1,658 metres high. In order to determine the adequacy of the site we examined the environmental and technical-economic aspects of a potential wind power plant siting. The essential element of research is the calculation of wind energy potential at this location. Measurements in a varied mid-altitude region characterised by harsh weather are anything but simple. Taking into account some assumptions, the calculation showed that this site was moderately adequate for utilisation of wind energy. A final calculation of wind energy potential at the Kržišče site would require measurements of vertical wind profile, showing how wind speed increases with increasing height above the ground. Under the assumption that wind speed at the height of axis is merely 6% higher than the measured speed, the internal rate of return is 5.08%. An alternative calculation considering a 22% higher wind speed that would apply in flatland gives a result of 9%.

Key words: wind power plant, wind energy potential, measurements, adequacy of site

## 1 Izhodišče

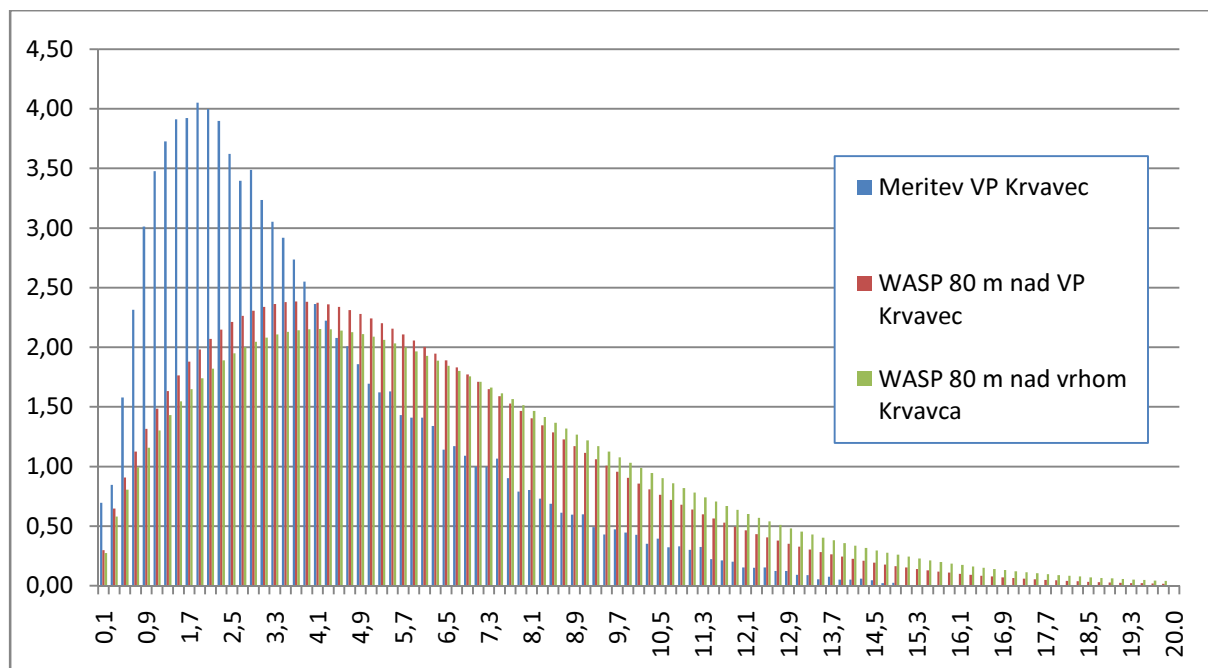
Gorenjske elektrarne d.o.o. so z namenom iskanja ustreznih obnovljivih virov pristopile k iskanju ugodne lokacije za izkoriščanje vetra na Gorenjskem. V iskanju morebitnih zanimivih lokacij za izkoriščanje vetrne energije smo izbrali kot potencialno lokacijo hrib Krvavec. Razlogi za tak izbor so naslednji:

- Po izkušnjah smo vedeli, da je Krvavec zelo vetroven hrib
- Na Krvavcu je nameščenih že celo vrsto različnih objektov, kot so hoteli, kočice, TV oddajni stolp, sedežnice, žičnice, gondola. Pri veliki količini že izvedenih posegov v prostor argument naravovarstvenikov, da bo poseg v prostor pomenil degradacijo naravnega okolja ne drži. Okolje je namreč na Krvavcu že tako ali tako degradirano.
- Poizvedba pri Društvu za opazovanje in preučevanje ptic selivk je dala pozitiven rezultat – da vetrna turbina na Krvavcu ni v konfliktu z velikimi ujedami.
- Na območju sta dve agrarni pašni skupnosti. Pašna skupnost, ki ima v lasti vrh Krvavca ni bila zainteresirana za postavitev vetrne turbine, v nasprotju pa je interes pokazala pašna skupnost Jezerca, ki ima v lasti vrh Kržišča.
- Območje na vrhu Kržišča nima nobenih naravovarstvenih zaščit, med tem, ko je greben od Krvavca to Zvoha v glavnini vključen v območje Natura 2000.

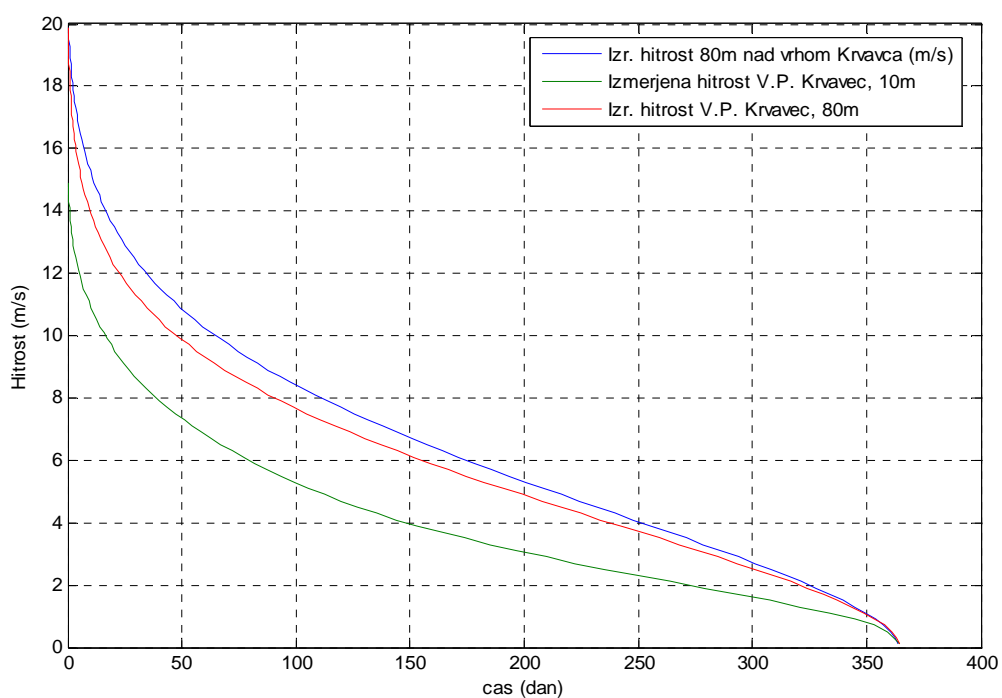
Strinjanje lastnika zemljišča in pa neprisotnost naravovarstvenih zaščit na območju sta bila odločilna, da smo se odločili najprej preveriti primernost lokacije vrh hriba Kržišče na namestitev Vetrne turbine.

## 2 Meritev ARSO v bližnji vremenski postaji

Na Krvavcu je nameščena vremenska postaja, ki med drugimi parametri spremlja tudi hitrost vetra. Vremenska postaja je locirana nekoliko v zavetrju bližnjega doma na Krvavcu in TV stolpa, zato daje prenizke hitrosti vetra. Kljub temu so zaradi neposredne bližine in zaradi dolgotrajnosti izvajanja meritev podatki vremenske postaje zanimivi za analizo in primerjavo. ARSO je izvedel analizo vetra na Vrh hriba Krvavec, v kateri je na osnovi modela WASP modeliral veter glede na model terena in glede na merilne podatke vremenske postaje. Rezultat simulacije na modelu WASP je podal veter na višini 20 m in 80 m nad Vrhom Krvavca, ki so prikazani na slikah.



Slika 1: Histogram izmerjene hitrosti vetra v hitrostnih pasovih širine 0,2 m/s v vremenski postaji Krvavec (merilnik na višini 10 m, koordinate: ) , ter rezultat WASP simulacije 80 m nad VP Krvavec in 80 m nad vrhom hriba Krvavec



Slika 2: Urejeni diagram trajanja hitrosti vetra na različnih točkah na Krvavcu

### 3 Postavitev merilnega stebra



Slika 3: Merilni steber na Kržišču

Postavitev merilnega stebra je bila zelo zahtevna, saj je v gorskem svetu gradnja precejšen logistični problem. Dostopnost do lokacije stebra je možna le v daljšem suhem vremenu, ko se travnišče pašnika posuši, tako da terensko vozilo pri vožnji ne naredi škode na travnišču.

Vse stvari je potrebno pripeljati iz doline na vrh hriba. Zaradi zahtevne logistike je gradnja na taki lokaciji precej dražja.

Nameščen je steber s preklopom, da za potrebe morebitne menjave senzorjev ni potrebno plezati na vrh stebra, temveč se steber preklopi in se lahko senzorji zamenjajo kar na tleh. Izbrana rešitev stebra s preklopom se je izkazala za zelo koristno.

Na lokaciji je nastal znan problem z zelo slabo prevodnostjo ozemljila za strelovod. Zemlje je zelo malo ali skoraj nič, povsod je skalnat teren. S pašno skupnostjo je dogovorjen čim manjši poseg v prostor. Ustreznega ozemljila zato zaradi visokih stroškov in gradnjein odškodnine stroška ni bilo možno zgraditi. Izkop bi povzročil preveliko škodo na travišču, ki se po takem posegu več let ne zaraste zaradi kratke vegetacijske dobe v gorskem svetu. Zakopana sta bila dva pocinkana jeklena trakova skupne dolžine 40 m, ki pa ne zadoščata za doseganje sprejemljivo nizke ponikalne upornosti ozemljila.

Z namenom preprečitve zaledenitve senzorjev v zimskem času so bili nameščeni senzorji z ogrevanjem vrtljivih delov. Položen je bil šibak kabel preseka  $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$  za potrebno napajalno moč 50 W. Priključna točka kabla je bil vrh vlečnice Kržišče, oddaljen cca 300 m. Ta kabel in pa slaba ozemljitev se je izkazala za nezadostno rešitev, saj z namestitvijo izolacijskih ločilnih transformatorjev ni bilo možno preprečiti udara strele v merilno postajo. Pri udaru strele v steber je prišlo do potencialnega lijaka potenciala zemlje z napetostno razliko med obema koncema napajalnega kabla večjo od 40 kV (izolacijska trdnost ločilnega transformatorja), kar je povzročilo preboj ločilnega transformatorja in uničenje elektronike in senzorjev merilne postaje.

#### **4 Rezultati meritev**

Meritev je zaradi težav s strelo nemoteno potekala v času od 16.10.2010 do 15.5.2011, ter od 16.9.2011 do 15.12.2011, skupno torej 10 mesecev. Zaradi udara strele ni bila izmerjena hitrost vetra v poletnih mesecih, ko naj bi bilo po besedah domačinov vetra veliko. Za izvedbo izračuna povprečne hitrosti in povprečne moči bodo obdobja izpadle meritve nadomeščena s podatki bližnje VP. Krvavec, kateri bodo ustrezno prilagojeni in ustrezno skalirani, glede na razmerje v hitrosti vetra za obdobje ko imamo obe meritvi. Na ta način dopolnjen niz podatkov je osnova za izračun 1 letnega profila vetra v času trajanja meritve. Sledi primerjava 1 letnega profila vetra na lokaciji vrh Kržišča z 1 letnim profilom vetra v istem obdobju na lokaciji VP Krvavec in primerjava le tega z dolgoletnimi meritvami vetra na VP Krvavec. Na ta način je možno določiti dolgoletno povprečni profil vetra na vrhu Kržišča.

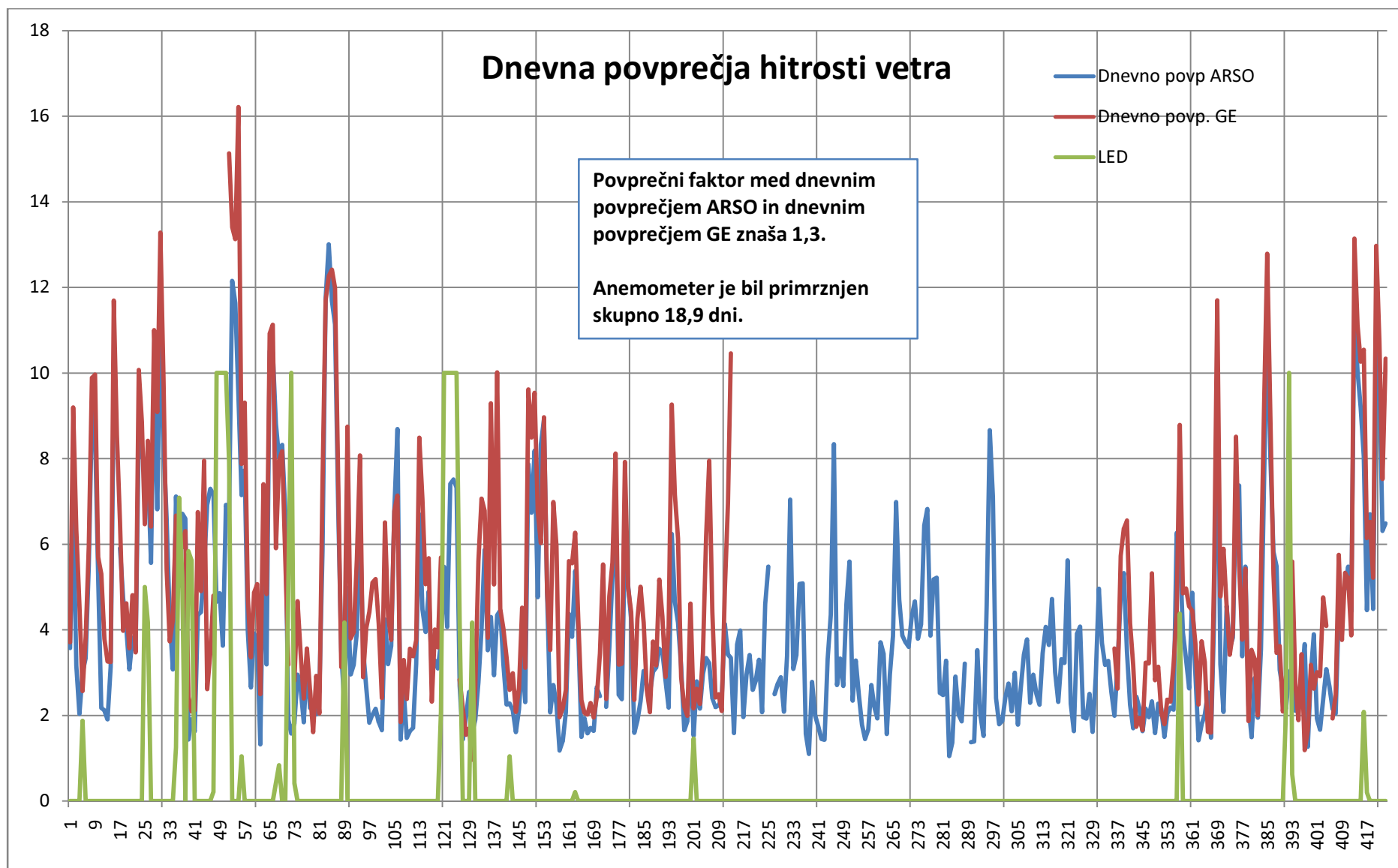
Datum	Čas	Smer povp.	Smer minimaln a	Smer maksimaln a	Smer St.dev.	Rel. vlažnos t	Zračni tlak	Temperatur a	Hitrost - povp.	Hitrost min.	Hitrost max	Hitrost St. dev.
31.10.2010	13:30:00	187,606	125	260	14,351	104,605	830,801	4,555	8,138	3,076	14,62	2,015
31.10.2010	13:40:00	189,4	50	295	15,847	104,666	830,674	4,602	9,459	3,461	15,101	2,052
31.10.2010	13:50:00	191,683	120	267,5	13,294	104,666	830,738	4,61	8,522	1,922	13,947	1,814
31.10.2010	14:00:00	189,398	100	260	15,221	104,727	830,738	4,706	9,509	3,461	15,678	1,888
31.10.2010	14:10:00	187,82	127,5	292,5	13,706	104,666	830,738	4,75	9,585	2,499	16,159	2,142
31.10.2010	14:20:00	191,308	120	247,5	12,107	104,605	830,547	4,726	11,577	5,481	16,352	1,914
31.10.2010	14:30:00	186,18	67,5	270	18,52	104,666	830,484	4,692	9,377	2,306	17,891	2,397
31.10.2010	14:40:00	187,826	90	272,5	12,974	104,605	830,357	4,669	10,87	4,808	15,582	2,12
31.10.2010	14:50:00	186,463	112,5	257,5	14,009	104,666	830,293	4,657	10,525	3,461	15,39	2,176
31.10.2010	15:00:00	186,896	10	275	15,898	104,605	830,23	4,648	11,689	2,403	18,468	2,503
31.10.2010	15:10:00	186,135	125	282,5	13,197	104,605	830,166	4,578	11,521	2,306	16,448	2,479
31.10.2010	15:20:00	187,943	90	287,5	16,522	104,666	830,166	4,524	11,304	4,327	17,217	2,291
31.10.2010	15:30:00	183,927	115	230	12,801	104,666	830,166	4,511	11,34	4,711	17,987	2,721
31.10.2010	15:40:00	184,014	85	265	15,174	104,788	830,166	4,587	11,284	4,615	17,602	2,394

Tabela 1: Oblika merjenih podatkov VP Kržišče



		Dnevna povprečja meritve vetra																														
MESEČ	1	2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		Povp.		Povp.
DAN	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	GE	ARSO	
1	3,32		5,90	6,50	7,16	4,80	2,18	2,58	1,48	2,38	2,94	5,06	1,71	2,28	1,65	2,21	2,89		2,21	1,37		5,62		2,15	2,07	1,94	2,00	4,43	3,87	3,15	3,37	
2	3,50		4,73	3,98	4,65		2,24	1,61	1,63	3,56	4,33	10,01	1,64	1,95	1,87	1,99	2,09		1,93	1,39		2,27		1,50	1,79	3,54	5,35	11,53	13,14	3,26	4,77	
3	3,68		4,04	4,62	4,85		2,02	2,92	1,70	3,38	4,45	4,49	2,66	2,43	3,43	4,61	3,39		3,71	3,52		1,63		2,04	2,36	7,49	9,24	10,04	11,12	3,91	5,02	
4	6,48		3,07	3,57	3,63		2,56	2,04	3,20	3,75	3,19	4,03	2,45	3,44	1,53	2,16	7,04		3,43	2,00		3,91		2,18	2,32	11,42	12,79	9,20	10,27	4,38	4,98	
5	8,33		3,81	4,81	6,91		5,84	7,44	6,70	8,49	2,25	3,37		5,53	2,79	2,62	3,09		1,56	1,52		4,07		2,13	3,18	8,05	9,02	8,05	10,54	4,65	6,33	
6	2,96		3,51	3,47	6,70	15,13	11,74	11,69	4,47	7,05	2,28	2,59	2,20	2,38	2,16	2,26	3,41		2,95	4,57		1,96		6,26	4,39	5,82	5,30	4,46	6,14	4,43	5,32	
7	1,75		8,60	10,07	12,15	13,41	13,00	12,26	3,95	5,06	2,13	2,98	3,58	4,78	2,97	3,46	5,07		3,86	8,66		1,93		5,92	8,78	5,47	3,46	6,70	6,52	5,72	7,00	
8	4,64		8,09	8,85	11,63	13,13	11,69	12,42	4,89	5,67	1,61	2,08	5,26	5,57	3,34	6,18	5,08		6,98	7,10		2,50		3,94	4,85	3,05	3,62	4,49	5,21	5,62	6,76	
9	2,41		7,89	6,47	9,45	16,22	11,14	11,98	3,01	2,32	2,14	2,64	7,02	8,12	3,21	7,95	1,57		4,71	2,40		1,61		3,31	4,96	2,59	2,09	11,26	12,97	4,92	6,64	
10	2,35		7,75	8,41	7,15	7,88	6,92	7,59	3,28	4,00	3,35	4,52	2,48	3,19	2,40	4,41	1,10		3,87	1,79		2,89		2,63	4,54	2,15	2,90	9,81	10,74	3,99	5,74	
11	2,56		5,56	6,41	7,73	9,31	3,50	3,13	3,10	3,59	2,31	3,11	2,38	3,21	2,19	2,42	2,78		3,71	1,87		4,96		4,86	4,44	2,99		6,31	7,52	3,78	5,03	
12	2,90		10,18	11,00	3,96	4,77	2,22	3,15	3,68	5,69	7,86	9,61	6,06	7,92	2,24	2,49	2,00		3,60	2,43		3,68		2,95	3,68	3,11	5,59	6,48	10,33	4,22	6,16	
13	3,35		6,81	9,09	2,65	3,36	4,98	8,75	5,47		6,74	8,49	5,05	5,00	2,39	2,10	1,74		4,31	2,74		3,18		1,42	2,25	2,11	2,75			3,78	4,73	
14	1,37		10,97	13,28	3,92	4,88	2,95	3,80	4,07		8,19	9,54	4,24	4,42	4,14	4,93	1,45		4,66	2,10		3,27		1,79	3,73	2,18	1,89			3,95	5,81	
15	2,21		8,38	9,88	3,72	5,07	3,19	3,94	7,41		4,76	6,77	1,59	2,36	3,42	6,96	1,43		3,79	3,00		2,55		2,01	3,25	2,88	3,43			3,60	5,21	
16	3,57	3,71	6,61	5,41	1,32	2,49	3,94	5,65	7,51		8,33	6,03	1,89	4,25	3,34	10,46	3,32		4,13	1,78		1,99	3,56	2,53	1,61	3,66	1,19			3,84	4,09	
17	6,92	9,20	4,25	3,73	5,93	7,40	6,58	8,07	7,32		8,91	8,97	2,33	5,00	1,59		4,35		6,43	2,64		3,21	2,62	1,48	1,60	1,27	1,65			4,51	5,36	
18	3,16	6,34	3,08	4,24	3,19	4,83	3,55	2,89	2,69	2,83	4,85	4,89	3,04	4,17	3,65		8,34		6,82	3,42		4,78	5,73	4,29	5,33	3,02	3,18			4,08	4,51	
19	2,04	4,58	7,11	6,67	10,51	10,91	2,65	4,04	1,44	2,18	2,07	3,53	2,70	2,59	3,98		2,71		3,86	3,78		5,32	6,37	9,85	11,70	3,89	2,62			4,40	5,50	
20	2,99	2,57	5,02	6,49	10,47	11,13	1,83	4,41	1,94	1,55	2,71	6,99	2,52	2,07	1,96		3,33		5,18	2,30		3,49	6,55	3,19	4,78	1,93	3,01			3,49	4,88	
21	3,34	3,83	6,71	5,93	8,81	5,91	2,02	5,10	2,54	1,69	2,25	5,96	3,02	3,73	2,95		2,69		5,21	2,95		2,24	4,15	2,08	5,89	1,67	2,92			3,46	4,43	
22	5,49	5,95	6,59	6,30	8,01	7,94	2,15	5,18	1,59	0,96	1,18	1,96	3,11	3,17	3,41		4,59		2,53	2,50		1,70	3,17	4,55	4,55	2,38	4,75			3,56	4,51	
23	9,12	9,89	1,43	2,42	8,32	8,17	1,84	4,15	1,90	2,65	1,39	2,15	3,55	5,17	2,60		5,59		2,48	2,25		2,44	1,73	3,58	3,41	3,08	4,09			3,51	4,58	
24	8,64	9,96	1,90	2,09	6,76	5,66	1,65	2,40	2,77	5,60	2,07	2,59	3,49	4,31	2,82		2,34		3,28	3,45		2,16	1,94	3,82	3,93	2,67			3,42	4,42		
25	5,23	5,69	1,63	2,12	1,89	3,18	4,24	6,51	4,01	7,06	4,37	5,61	2,81	2,90	3,30		3,28		1,05	4,06		1,63	1,65	7,07	8,51	2,15	1,93			3,34	4,72	
26	2,18	5,30	4,35	6,75	1,58		3,20	4,30	5,87	6,78	3,84	5,55	2,18	4,08	2,08		2,48		1,37	3,64		2,16	3,23	7,37	5,50	2,04	2,48			3,17	4,89	
27	2,12	3,79	4,41	4,90	1,82	2,81	3,63	3,76	3,52	3,82	5,38	6,27	6,24	9,26	4,60		1,78		2,91	4,71		1,95	3,21	3,38	3,77	4,44	5,75			3,63	4,74	
28	1,91	3,26	5,48	7,95	2,95	4,66	6,80	6,76	4,30	9,29	3,87	4,21	4,65	7,15	5,48		1,45		2,02	3,01		2,33	5,32	5,48	5,42	4,86	3,77			3,79	5,79	
29	3,13	3,25	6,93	2,61	2,63	3,43	8,69	7,13			1,50	2,35	4,17	6,14			1,66		1,86	2,31		1,59	2,82	2,23	1,87	4,96	5,33			3,47	4,04	
30	9,56	11,69	7,29	3,46	1,84	2,39	1,43	1,85			1,94	2,06	3,14	2,89	2,49		2,71		3,21	3,31		2,27	3,13	1,49	3,52	5,48	5,20			3,47	4,08	
31		8,55			3,25	3,56	2,58	3,29			1,58	2,02			2,73					3,23			2,87	3,32						2,71	4,15	
Povp.	4.01	6.19	5.73	6.29	5.66	6.45	4.61	5.52	3.76	4.40	3.70	4.86	3.37	4.31	2.81	3.81	3.14	3.56	3.11	2.82	3.73	3.56	4.27	3.74	4.20	7.73	9.14	3.95	5.10			

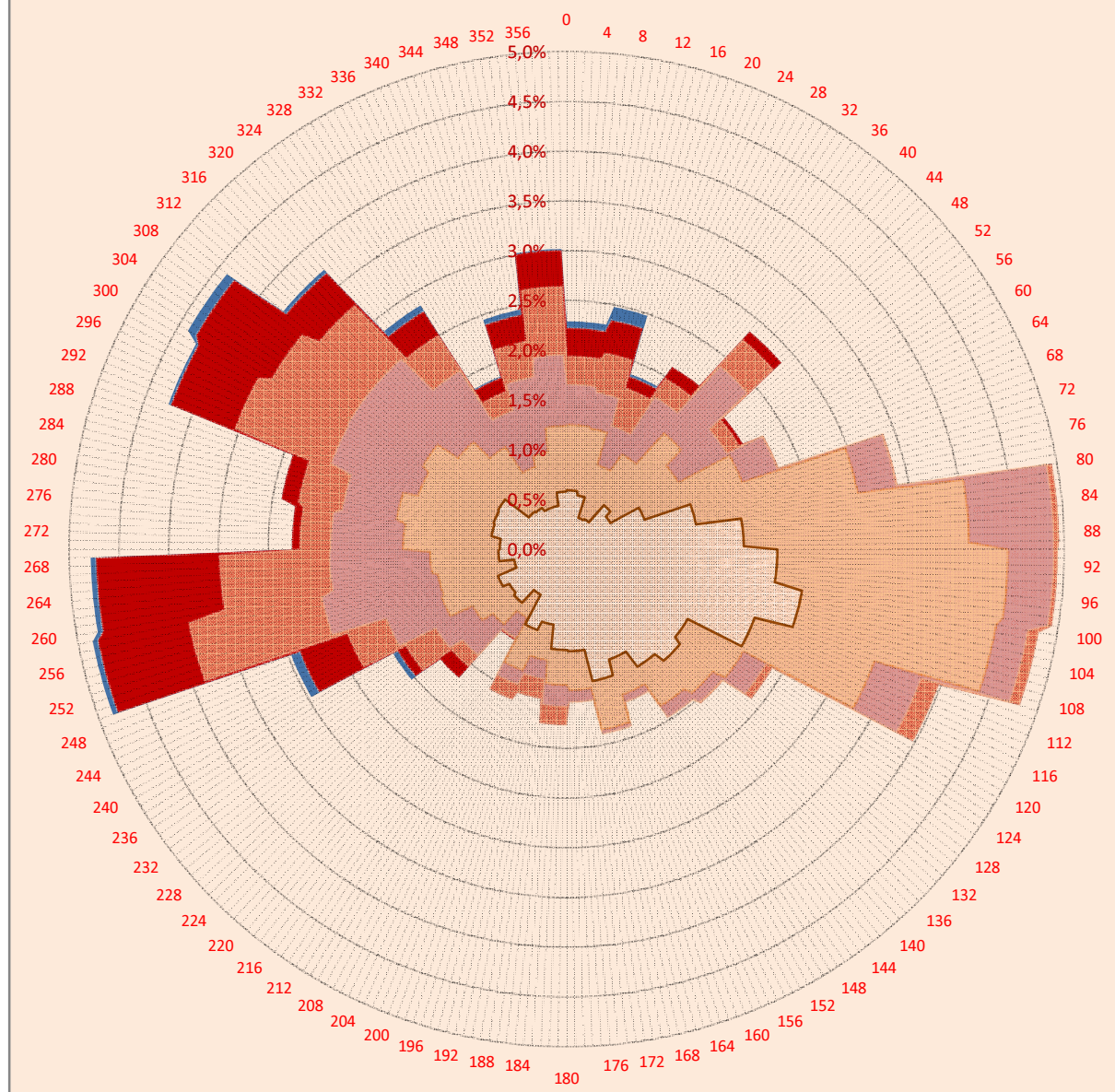
Tabela2: Dnevna povprečja meritve vetra



Slika4: Graf dnevnih povprečij vetra

# Vetrna roža Veter na Kržišču (m/s) meritev na 21m stebru

■ >15 ■ 12-15 ■ 9-12 ■ 6-9 ■ 3-6 ■ 0-3



Slika 5: Vetrna roža – meritev vetra na Kržišču

## 5 Vertikalni profil vetra

Meritev vetra je potekala na merilnem stebru višine 21 m. Na tej lokaciji se predvideva postavitve vetrnice moči med 1 in 1,6 MW ki ima steber visok okrog 80 metrov. Za pravilni izračun proizvodnje vetrne energije je nujno potrebna določitev vertikalnega profila vetra, to je odvisnost hitrosti vetra od oddaljenosti od tal, da lahko izračunamo hitrost vetra na višini rotorja vetrnice.

V ravninskem svetu velja logaritemska odvisnost hitrosti vetra, ki jo analitično opisuje naslednja enačba:

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) + \psi(z, z_0, L) \right]$$

$u_*$	is the friction (or shear) velocity (m/s),
$\kappa$	von Karman constant (~0.41),
$d$	is the zero plane displacement,
$z_0$	surface roughness (m),
$\psi$	stability term (nonlinear)
$L$	Monin-Obukhov stability parameter.

Vetrna industrija uporablja poenostavljeno enačbo brez stabilnostnega dodatka, ki je za ravninski svet z enakomerno hrapavostjo enak 0. Poenostavljena enačba je znana kot »Wind profile powerlaw«:

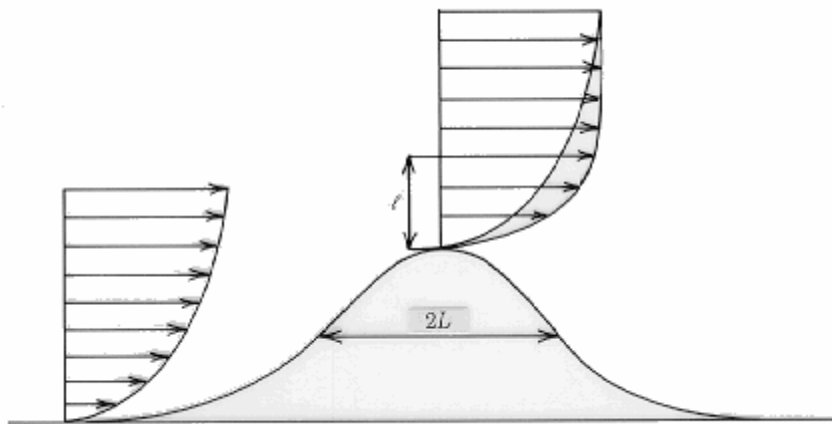
$$\frac{v_{HH}}{v_{H'}} = \left( \frac{HH}{H'} \right)^\alpha$$

$v$ :	wind speed [m/s]
$HH$ :	turbine hub height [m]
$H'$ :	lower height, if possible at lower blade tip height [m]
$\alpha$ :	wind shear exponent [-]

V razgibanem hribovitem terenu je nelinearni stabilnostni del enačbe tako velik, da bistveno vpliva na vertikalni profil vetra, zato poenostavljene eksponentne enačbe ni možno uporabljati. Vertikalni profil vetra je v razgibanem hribovitem svetu možno določiti le z meritvijo z uporabo merilne naprave Sodar, ki uporablja Dopplerjev efekt odbitega zvoka od delcev prahu v zraku ali z uporabo merilne naprave Lidar, ki uporablja lasersko tehnologijo - merjenje odbite svetlobe od delcev v zraku in na ta način simultano izračunava hitrost vetra na različnih višinah. Korektna ocena vertikalnega profila vetra je možna izključno z izvedbo meritve, ki v fazi te raziskovalne naloge zaradi ekonomskih razlogov ni bila izvedena.

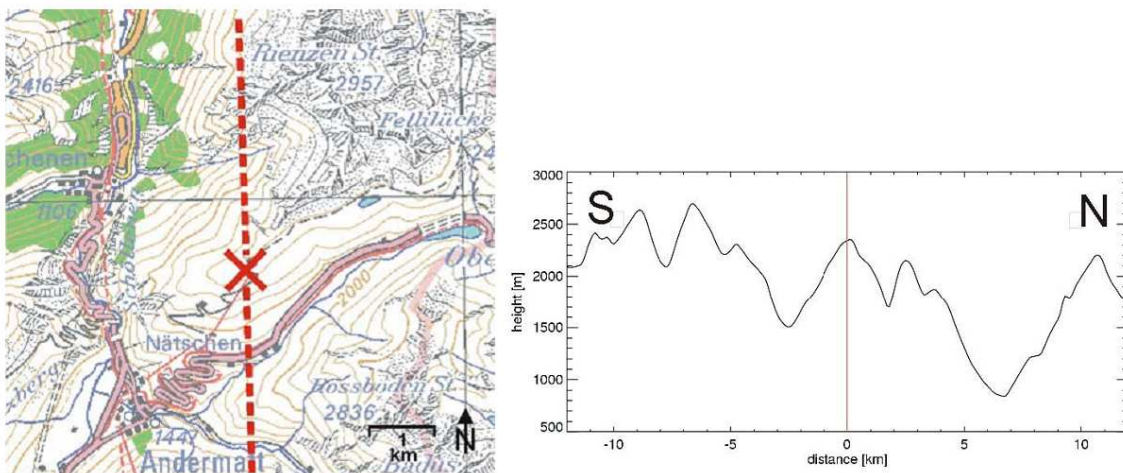
Izvedel sem analizo primerjalnih podatkov o izvedenih meritvah vertikalnega profila vetra na lokacijah z razgibanim terenom. Na lokaciji meritve vetra na Kržišču imamo primer meritve na vrhu hriba, ki ga prikazuje spodnja slika. Zaradi zgostitve hitrostnih plasti vetra ne velja več logaritemska zakonitost večanja hitrosti z oddaljenostjo od tal, ampak se veter z oddaljenostjo od tal na majhnih višinah najprej zelo hitro povečuje, na neki višini pa pride do kolena krivulje vertikalnega profila in od tam dalje je veter z višino skoraj konstanten saj se izenači z višinskim vetrom na ravnini pred hribom. Tak vertikalni profil vetra so ugotovili na Danskem (hrib Askervein). Gre za primer osamelega hriba, ki izstopa iz ravnine, zato ta profil ravno tako ni najbolj primerjalen z gorskim razgibanim terenom na Kržišču. Na hribu Askervein se je hitrost vetra izenačila z izračunano hitrostjo po logaritemski enačbi na višini približno  $2 \times L$ , kjer je  $L$  karakteristična širina hriba.

Slika6: Efekt hriba na vertikalni profil vetra

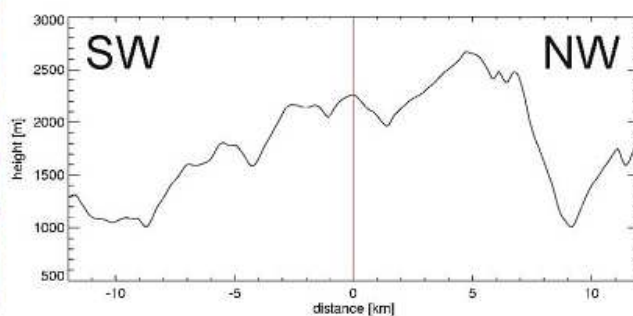


Slika6: Efekt hriba na vertikalni profil vetra

Naslednji primer meritve vertikalnega profila vetra je izvedlo švicarsko podjetje Meteotest v Švici na lokaciji gore Guetsch in gore CrapSognGion.



Slika7: Levo: lokacija meritve vetra na gori Guetschoznačena z rdečim križcem, črtkasta črta označuje glavno smer vetra. Desno: topografija terena po glavni smeri vetra

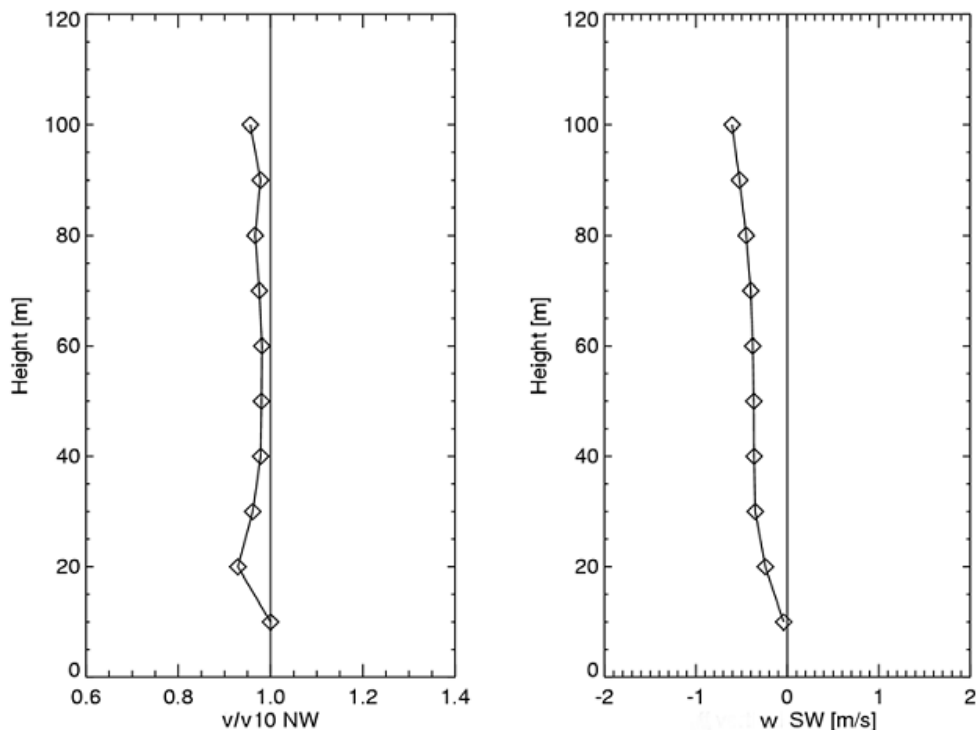


Slika8: Levo: lokacija meritve vetra na gori CrapSognGionoznačena z rdečim križcem, črtkasta črta označuje glavno smer vetra. Desno: topografija terena po glavni smeri vetra

Na obeh lokacijah so izmerili zelo podoben vertikalni profil vetra, ki je prikazan na naslednji sliki. Meritev so izvajali z uporabo Sodarja Aerovironment 4000 mini sodar, prikazan na sliki ter primerjalno meritvijo vetra s klasičnim anemometrom na merilnem stebru višine 10 m.

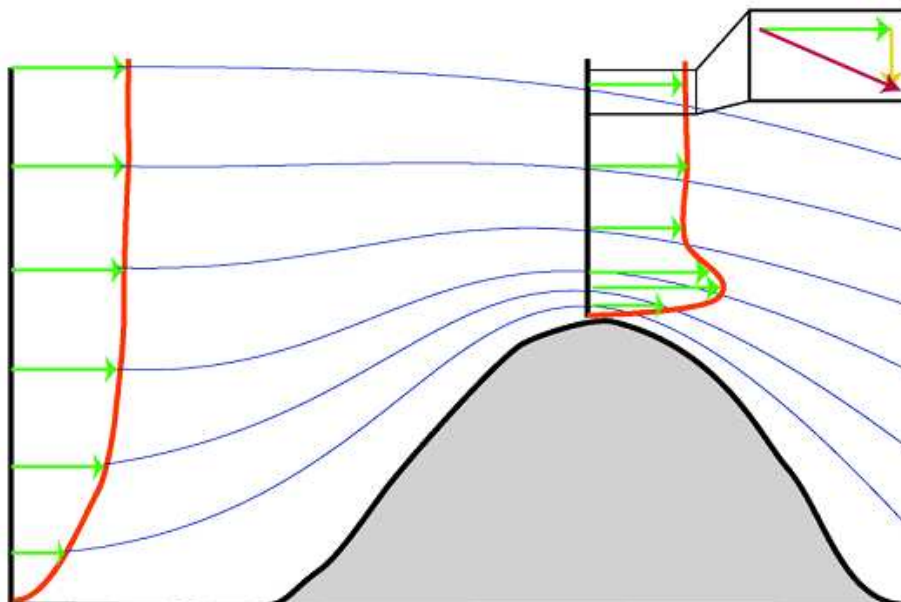


Slika 9: Sodar na gori Guitsch



Slika 10: Levo: Vertikalni profil hitrosti vetra na CrapSognGion-u, normiran z meritvijo standardnega anemometra na 10 m višine. Desno: Vertikalna komponenta vetra.

Ugotovili so, da je hitrost vetra z višino najprej upadla, nato pa je opazna logaritemska počasna rast in z nadaljnim višanjem ni več bistvenih sprememb vetra. Ocenili so da pride ravn na višini 10 metrov, kjer je referenčna meritev vetra s klasičnim anemometrom do največje zgostitve vetra zaradi izbočenega terena – efekt je prikazan na spodnji risbi. Na višini 20 metrov je hitrost vetra ravno najmanjša.



Slika 11: Efekt hriba na vertikalni profil vetra

Oblika krivulje vertikalnega profila vetra je zelo odvisna od oblike terena in se tudi spreminja glede na smer vetra. Krivulja je za vsako lokacijo drugačna. Za vrh hriba kaže krivulja

karakteristične značilnosti hitrega porasta hitrosti z oddaljevanjem od tal pri nizkih višinah in skoraj konstantno hitrost od neke višine navzgor.

Določitev hitrosti vetra na večjih višinah je v razgibanem svetu zato možna zgolj z izvedbo meritve vertikalnega profila vetra.

**Na Kržišču merimo veter na višini 21 metrov nad tlemi. Točka meritve ravno sovpada s točko minimalne izmerjene hitrosti vetra v primeru švicarskih meritev, ki so izvedene v podobnem reliefu terena. Ob predpostavki, da je na Kržišču enak vertikalni profil vetra kot na dveh švicarskih izmerjenih lokacijah, lahko predpostavimo da bo na višini osi vetrnice hitrost vetra približno 6% višja od izmerjene na merilnem stebru višine 21 m.**

Uporaba eksponentne enačbe, ki se uporablja v ravninskem svetu bi dala na višini rotorja 22% višjo hitrost vetra, vendar bi zaradi neznanega profila vetra uporaba te formule predstavljala previsok nivo investicijskega tveganja.

## 6 Izračun povprečnega letnega profila vetra iz kratkoročne meritve na lokaciji in dolgoročne meritve v bližnji vremenski postaji

leto	hitrost (m/s)	delež podatkov (%)
1997	3,40	32.1
1998	3,40	91.4
1999	3,20	76.7
2000	3,60	29.2
2001	4,00	77.9
2002	4,40	97.1
2003	3,80	98.1
2004	4,00	97.9
2005	3,70	99.7
2006	4,00	99.3
2007	4,10	96.9
2008	4,20	96.4
2009	3,70	98.7
2010	3,80	98.0
2011	3,60	93.0
<b>povp:</b>	<b>3,79</b>	

Tabela 3: povprečna letna hitrost vetra na VP. Krvavec

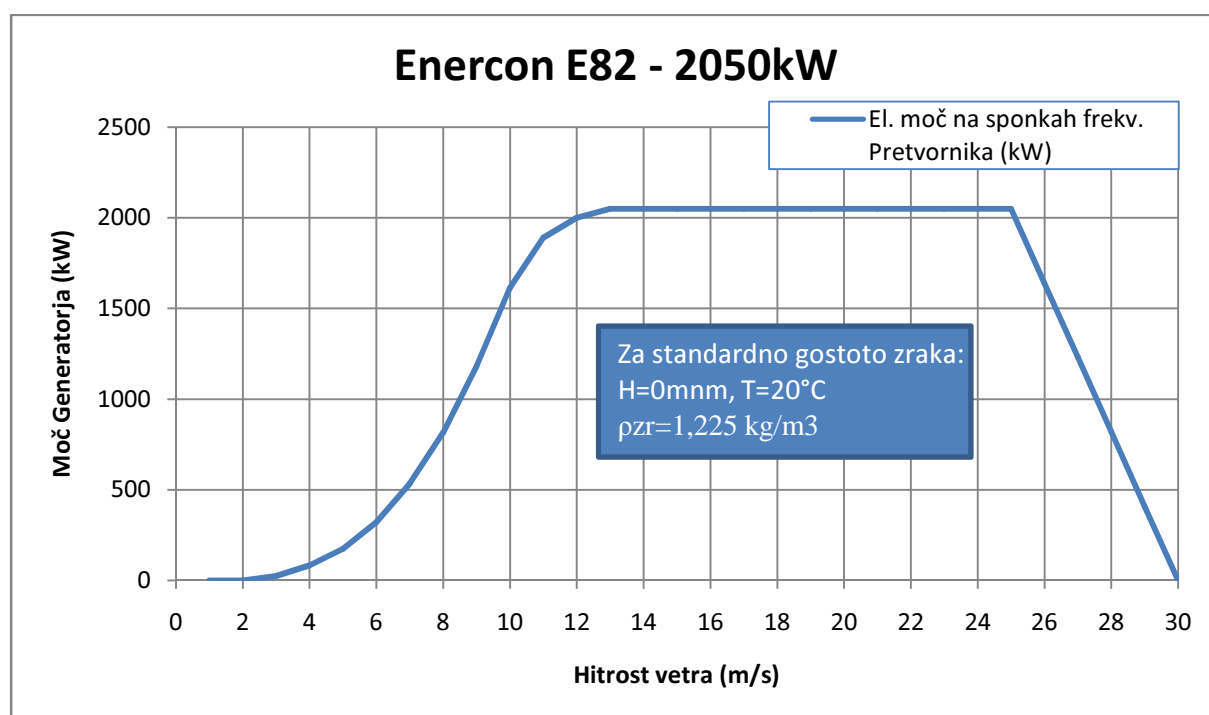
Pri analizi dolgoletnega povprečja vetra na Krvavcu ugotovimo, da je bila letu 2010 in 2011 povprečna hitrost vetra enaka dolgoletnemu povprečju, zato lahko povzamemo, da izračun proizvodnje EE v obdobju 2010 in 2011 pomeni kar povprečno letno proizvodnjo.

## 7 Izračun povprečne letne proizvodnje vetrne turbine

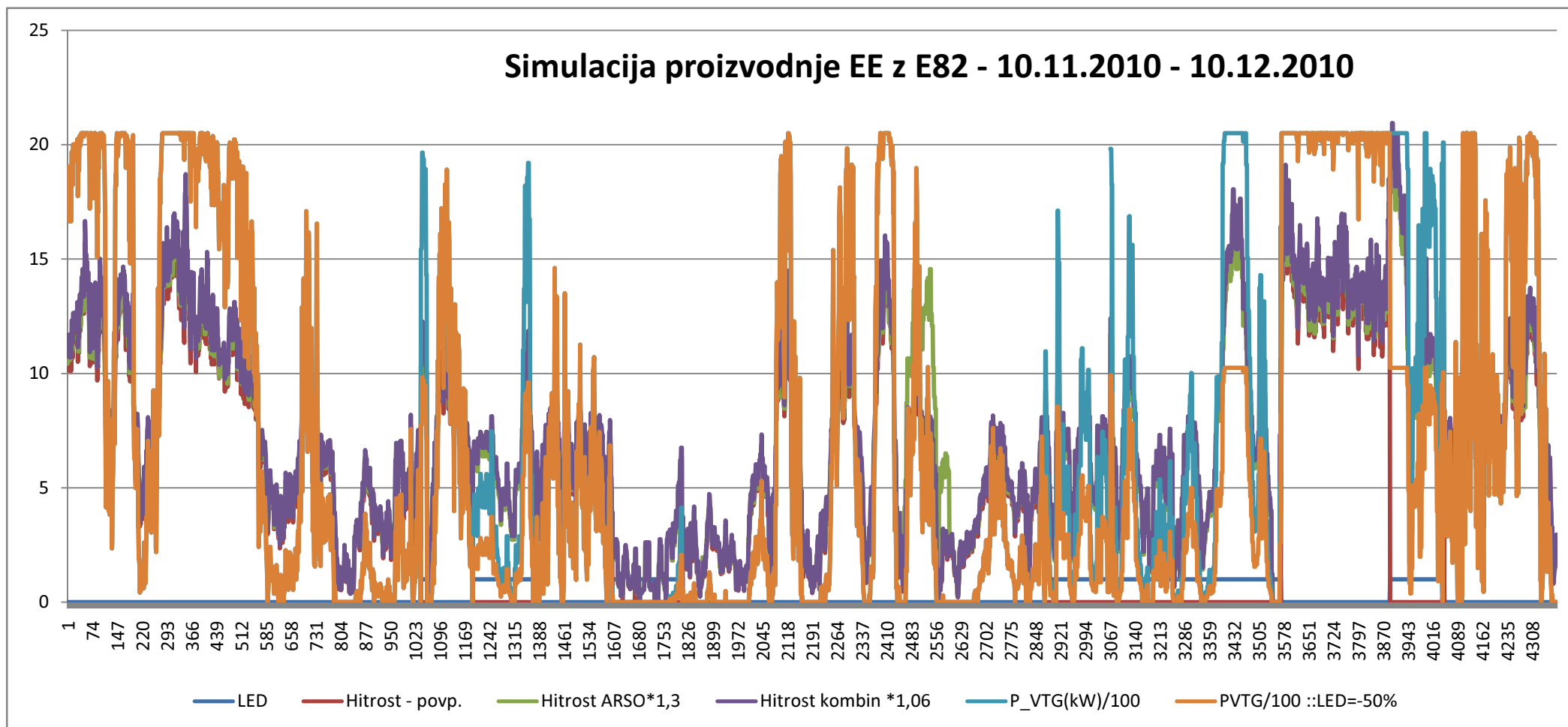
Izračun je izveden za primer namestitve vetrne turbine Enercon E82, moči 2.050 kW, premera rotorja 82 m.

V izračunu so upoštevane naslednji parametri:

1. Izračun je izveden na 10 minutnih povprečnih hitrostih vetra
2. Na voljo so merilni podatki v obdobju od 1.10.2010 do 12.12.2011. Za izračun letne proizvodnje se upoštevajo podatki od 16.10.2010 do 16.10.2011 – 16.10.2010 je pričetek zveznega niza meritve na Kržišču.
3. Upoštevan je diagram moči vetrne turbine v odvisnosti od hitrosti vetra, podan s strani proizvajalca, prikazan na spodnji sliki.
4. Upoštevana je realna energija vetra, ki je odvisna od gostote zraka. Izračun gostote zraka je izveden na osnovi meritve zračnega tlaka in temperature. Za vsak 10 minutni interval je izračunana prilagoditev diagrama vetrne turbine glede na resnično gostoto zraka, ki je manjša od standardne – za katero je podan diagram.
5. Upoštevana je na polovico zmanjšana proizvodnja EE v času, ko je ugotovljena zaledenitev senzorja hitrosti. Skupno je bilo ugotovljenih 21 dni obratovanja v pogojih zaledenitve. Izpad proizvodnje zaradi zaledenitve z upoštevanjem zgolj 50% proizvodnje znaša cca. 150 MWh.
6. Upoštevana 6% večja hitrost vetra na višini osi rotorja kot pa je izmerjena na stebru višine 21 m – vpliv vertikalnega profila vetra.
7. V času izpada meritve vetra na Kržišču je upoštevana meritev VP. ARSO na Krvavcu s faktorjem prilagoditve 1,3 – razmerje med povprečno hitrostjo na VP. Krvavec ARSO in meritvijo na Kržišču.



Slika 12: Diagram pretvorbe vetra v EE za Enercon E82



Slika 13: Simulacija proizvodnje EE z E82 na osnovi izmerjenih podatkov o hitrosti vetra



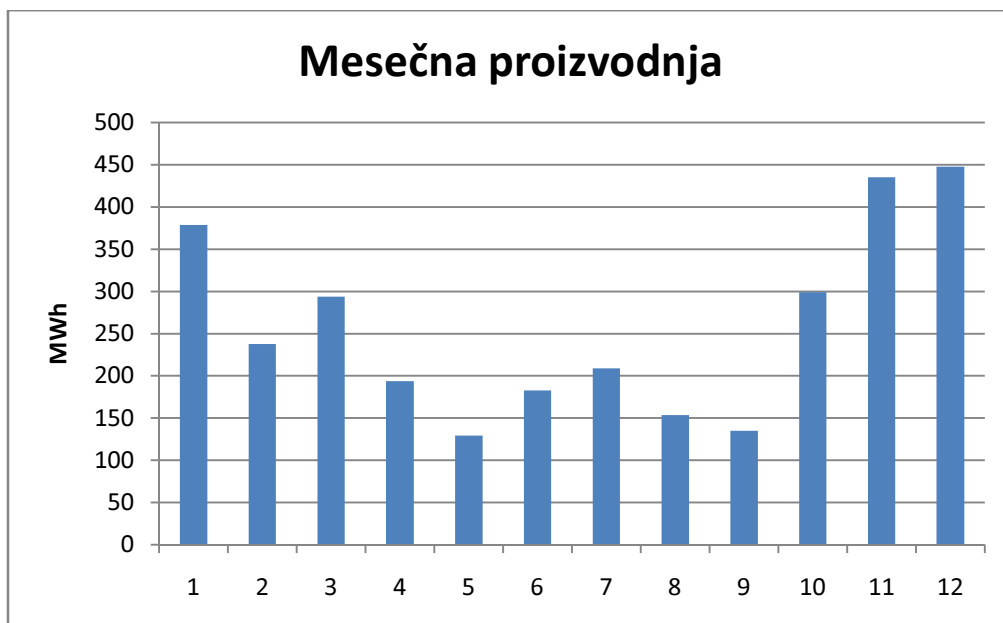
Slika 14: Histogram hitrosti vetra na 80 m z upoštevanjem 6% povečanja hitrosti

mesec

Dnevna proizvodnja EE (MWh)

dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Vsota
1	0,89	0,29	10,41	0,80	0,92	3,34	1,40	0,02	19,14	0,46	15,12	5,21	57,98
2	0,09	2,73	35,30	0,09	0,39	0,51	0,47	0,25	1,05	0,06	4,50	5,59	51,02
3	1,42	2,14	4,77	0,60	6,87	3,94	6,17	5,25	0,18	1,16	6,22	6,62	45,34
4	0,17	5,79	4,01	3,55	0,47	28,82	3,93	0,91	5,99	0,56	2,85	3,19	60,25
5	23,07	26,03	2,05	9,17	0,28	3,49	0,13	0,18	8,07	0,11	8,19	12,52	93,28
6	44,09	16,45	0,98	0,83	0,40	4,04	2,40	11,64	0,82	0,02	2,27	16,86	100,81
7	41,93	7,84	1,12	8,68	2,30	14,67	7,83	39,92	0,62	22,82	37,42	48,88	234,02
8	47,49	12,86	0,81	10,03	14,56	14,99	28,06	30,25	1,44	6,83	27,38	48,60	243,29
9	46,26	0,51	1,01	22,99	22,79	1,21	9,75	1,30	0,35	8,12	16,45	18,51	149,26
10	19,45	3,85	4,56	1,92	8,44	0,12	6,91	0,72	2,39	8,23	21,39	20,24	98,24
11	2,67	4,08	2,01	1,59	0,30	3,38	7,07	0,47	14,69	2,04	14,54	31,63	84,49
12	2,62	8,88	33,97	19,45	0,51	0,88	7,34	1,28	7,57	3,74	40,46	6,79	133,48
13	17,89	8,23	25,28	6,35	0,64	0,34	10,49	1,63	3,54	1,39	28,04	2,82	106,64
14	2,46	3,13	34,33	8,07	6,17	0,20	9,32	0,94	3,23	4,36	48,21	8,19	128,61
15	4,26	16,93	12,80	0,41	15,74	0,18	8,30	2,93	2,10	7,19	35,70	14,58	121,12
16	11,07	15,85	10,18	3,77	3,22	5,32	7,79	0,36	1,02	2,04	8,61	0,86	70,08
17	21,90	15,47	29,48	5,20	0,13	9,67	23,81	1,86	0,45	29,86	4,22	21,51	163,56
18	1,22	4,07	6,92	3,30	5,49	39,63	19,56	4,70	10,40	10,09	3,25	9,93	118,55
19	3,91	0,48	3,65	0,38	6,47	4,84	5,56	5,34	12,36	8,57	17,92	40,74	110,22
20	4,78	0,01	17,59	0,08	1,24	3,35	13,49	1,63	15,87	2,60	6,03	41,59	108,28
21	6,67	0,00	10,51	2,54	3,38	2,04	15,14	2,26	7,50	4,15	8,99	12,07	75,24
22	10,15	0,12	0,23	1,39	4,67	12,77	1,32	1,99	2,29	12,26	10,43	25,51	83,15
23	4,73	2,53	0,52	8,00	1,84	13,51	1,35	0,82	0,10	35,45	0,72	22,94	92,51
24	1,17	10,31	1,75	5,35	2,52	3,18	5,41	3,45	0,05	32,36	0,39	9,65	75,57
25	13,34	17,95	7,54	3,29	4,17	2,96	0,00	6,28	0,05	8,57	0,39	0,70	65,23
26	4,95	14,04	8,90	6,01	0,76	1,38	0,28	4,06	2,09	8,67	16,41	0,07	67,60
27	4,34	4,64	14,24	31,54	10,22	0,52	2,48	11,43	1,57	3,01	12,21	1,45	97,63
28	16,54	32,35	7,71	18,22	1,21	0,13	0,94	3,76	6,68	1,25	23,42	4,89	117,09
29	17,53	0,00	0,94	9,44	0,00	0,10	0,48	1,07	2,30	5,17	10,54	2,09	49,65
30	0,10	0,00	0,11	0,87	1,14	3,25	1,79	3,64	1,11	42,07	2,83	0,44	57,36
31	1,44	0,00	0,27	0,00	2,14	0,00	0,00	3,09	0,00	25,96	0,00	3,13	36,03
<b>Vsota</b>	<b>378,61</b>	<b>237,56</b>	<b>293,95</b>	<b>193,90</b>	<b>129,36</b>	<b>182,76</b>	<b>208,94</b>	<b>153,43</b>	<b>135,03</b>	<b>299,17</b>	<b>435,11</b>	<b>447,81</b>	<b>3.095,62</b>

Tabela 4: Dnevna proizvodnja EE za obdobje 15.10.2010 do 15.10. 2011 (upoštevano 6% povečanje hitrosti vetra na 80m)



Slika 15: mesečna proizvodnja za obdobje 15.10.2010 do 15.10.2011

		MWh
<b>LETNA PROIZVODNJA EE. (6% vert. profil)</b>		<b>3.096</b>
Izgube trafo 0,69/20kV+kabel	-3%	-93
Izpadi omrežja, vzdrževalna dela...	-3%	-93
<b>DEJANSKA OBRAČUNANA ENERGIJA</b>		<b>2.910</b>
<b>Število polnih obratovalnih ur</b>		<b>1.420</b>

Tabela 5: Rezultat simulacije pri upoštevanju 6% povečanju hitrosti vetra na 80m

		MWh
<b>LETNA PROIZVODNJA EE. (22% vert. prof.)</b>		<b>4.080</b>
Izgube trafo 0,69/20kV+kabel	-3%	-122
Izpadi omrežja, vzdrževalna dela...	-3%	-122
<b>DEJANSKA OBRAČUNANA ENERGIJA</b>		<b>3.836</b>
<b>Število polnih obratovalnih ur</b>		<b>1.871</b>

Tabela 6: Rezultat simulacije pri upoštevanju 22% povečanju hitrosti vetra na 80m

## 8 Izračun ekonomske upravičenosti investicije namestitve vetrne turbine na Kržišču

Izračun ekonomike izvedena za 25 letno obratovalno obdobje.

Letna proizvodnja EE:	2.910 MWh
Cena EE – Uredba o podporah OVE:	95,38 €/MWh
Letni prihodki:	277.527€/leto

Obratovalni stroški – ocena:	20.000 €/leto
Zavarovanje:	5.700 €/leto
Služnost:	2.000 €/leto

Amortizacija:	15 let
---------------	--------

Investicijsko vzdrževanje:

- |  |               |
|--|---------------|
| - Obnova rotorja vsakih 8-12 let             | cca. 50.000 € |
| - Menjava regulacijskih mehanizmov 12-15 let | cca. 125.000€ |

Upoštevana preostala vrednost naprave po 25 letnem obratovalnem ciklu: 500.000 €

### 8.1 Rezultat:

Neto sedanja vrednost pri zahtevani stopnji donosnosti kapitala 5%:

**NSV (5%) = 19.112 €**

Interna stopnja donosnosti kapitala:

**ISD = 5, 08%**

### 8.2 Alternativni izračun za 22% povečanje hitrosti vetra na 80m

Letna proizvodnja EE	<b>3.836 MWh</b>
<b>NSV (5%)</b>	<b>955.102 €</b>
<b>ISD</b>	<b>9,01%</b>

## 9 Zaključek

Lokacija na vrhu hriba Kržišče je izkazala manjše proizvodne rezultate od pričakovanih v kolikor upoštevamo zgolj 6% povečanje vetra na višini 80 m.

Simulacija proizvodnje s to predpostavko rezultira v povprečno letno proizvodnjo 2.910 MWh, kar pomeni 1.420 polnih obratovalnih ur, ter ISD v višini 5,08 %. Za dosego ugodne ekonomike projekta bi bilo potrebno doseči vsaj 1.600 polnih obratovalnih ur.

Alternativna simulacija proizvodnje z upoštevanjem 22% povečanja hitrosti vetra na višini osi vetrnice nam da letno proizvodnjo 3.836 MWh, kar pomeni 1870 polnih obratovalnih ur in zelo ugodno ekonomiko investicije z ISD=9%!

Kakšen je dejanski vertikalni profil vetra je mogoče ugotoviti izključno z izvedbo meritve. Kržišče je nižji hrib od bližnjega Krvavca in Zvoha, ki zato bistveno vplivata na obliko vertikalnega profila vetra – lokacija zato ni primerljiva z nobeno lokacijo, za katero je bilo mogoče dobiti podatke o izmerjenem vertikalnem profilu vetra.

Rezultati meritve vetra bi bili mnogo boljši na grebenu med Krvavcem in V. Zvohom, vendar je tam prisotna naravovarstvena zaščita Natura 2000 in bi bilo umeščanje turbine v prostor verjetno nemogoče.

Ugodno ekonomiko investicije je možno doseči tudi pri upoštevanju zgolj 6% povečanja hitrosti vetra na 80 metrih z znižanjem investicijskih stroškov na račun namestitve rabljene vetrne turbine. V tem primeru pa je seveda potrebno upoštevati višjo stopnjo tveganja okvar turbine.