

# ***ENERGIJA VJETRA***

# Energija vjetra

---



## Postanak

- *Okolo 1 do 2 posto energije koja dolazi od sunca pretvara se u energiju vjetra - od 50 do 100 puta više od energije pretvorene u biomasu od svih biljaka na Zemlji.*
- **Energija vjetra je kinetička energija (ovisi o kvadratu brzine vjetra):**

$$W = 1/2 \cdot m \cdot v^2$$

- Vjetroturbina dobiva ulaznu snagu pretvaranjem sile vjetra u okretnu silu koja djeluje na elise rotora. **Količina energije koju vjetar prenosi na rotor ovisi o površini kruga koji čini rotor u vrtnji, brzini vjetra, gustoći zraka i aerodinamici lopatica.**



- **Ukupna teorijska energija vjetra:**

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Vv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \qquad W = 0,625 \cdot A \cdot v^3$$

Gdje je:  $\rho$  - gustoća zraka (približno 1,25 kg/m<sup>3</sup>)

$A$  - površina rotora vjetroelektrane (volumen  $V = A \cdot v$ )

$v$  – brzina vjetra

- *Gustoća zraka se povećava se povećanjem vlažnosti. Također vrijedi da je zrak gušći kada je hladniji nego kad je topliji. Na visokim nadmorskim visinama tlak zraka je niži, pa je zrak rjeđi.*



- **Maksimalna energija vjetroturbine:**

*Maksimalna energija koja se teorijski može dobiti zračnom turbinom je 16/27 (0.59259) ukupne energije vjetra. Zrak mora strujati i nakon turbine da napravi mjesta zraku koji nadolazi. Vjetroturbina iskrivljuje putanju vjetra i prije nego što vjetar dođe do elisa rotora. To znači da se ne može iskoristiti svu energiju iz vjetra.*

*$\eta_{max}$  zračne turbine je 0.65*

*$\eta_{max}$  generatora 0.8 pa za maks. energiju vjetroelektrane vrijedi:*

$$W = 16 / 27 \cdot 0,65 \cdot 0,8 \cdot 0,625 \cdot A \cdot v^3$$

$$W = 0,193 \cdot A \cdot v^3$$

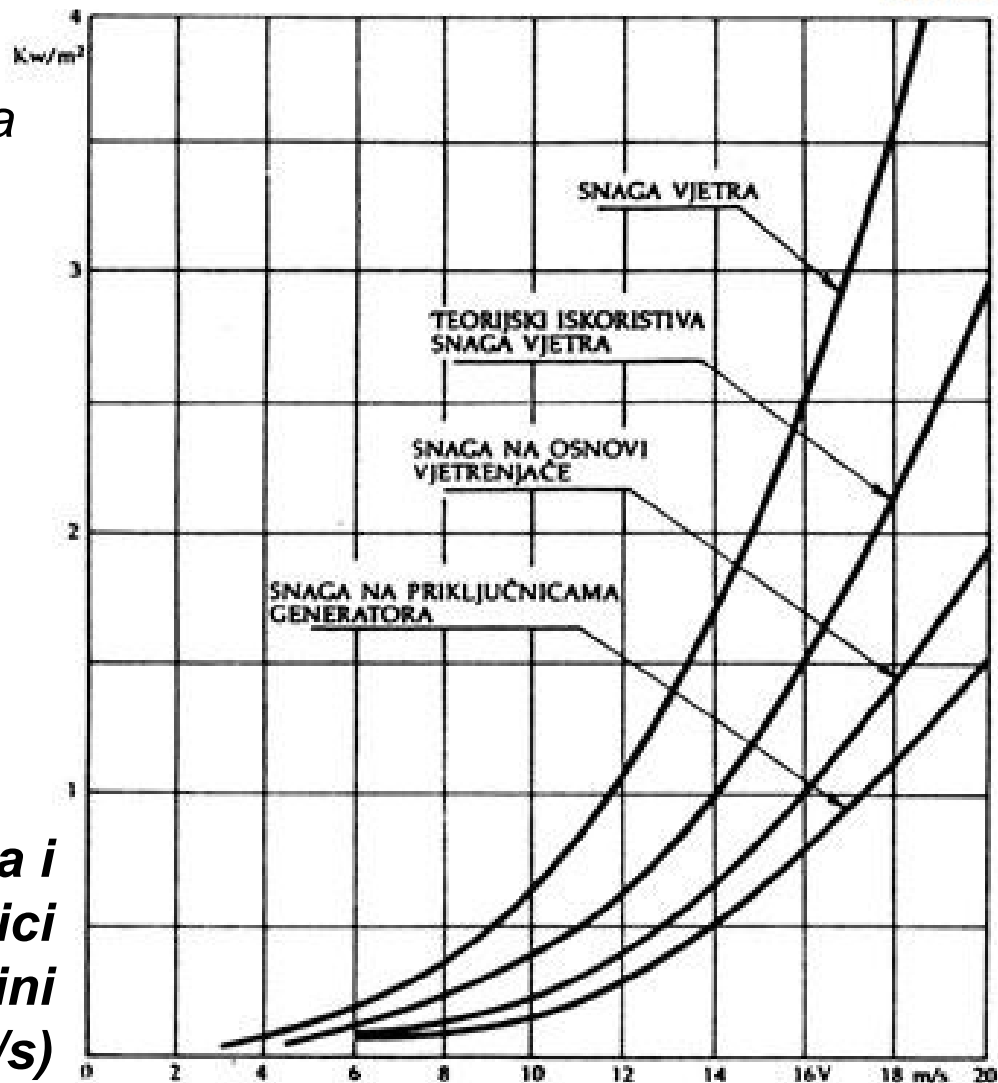
*Podložno promjenama ovisno o brzini vjetra i brini okretanja lopatica*

*Stupanj djelovanja vjetroelektrana oko **31%** - kinetičke energije vjetra za proizvodnju električne energije.*



- *Poznavanje brzine i statistike vjetra ima osnovnu važnost za ocjenu mogućnosti iskorištavanja vjetra u energetske svrhe.*
- *Brzina vjetra se povećava sa visinom iznad tla. Može se računati da je omjer brzina razmjernan petom korijenu iz omjera visina nad zemljom*

**Ovisnost snage vjetra i vjetroturbine po jedinici površine ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) o brzini vjetra ( $\text{m}/\text{s}$ )**



## Promjenjivost brzine vjetra u vremenu

dnevno (često uzrokovano promj. temp.):

- more
- padine planina



# Energija vjetra

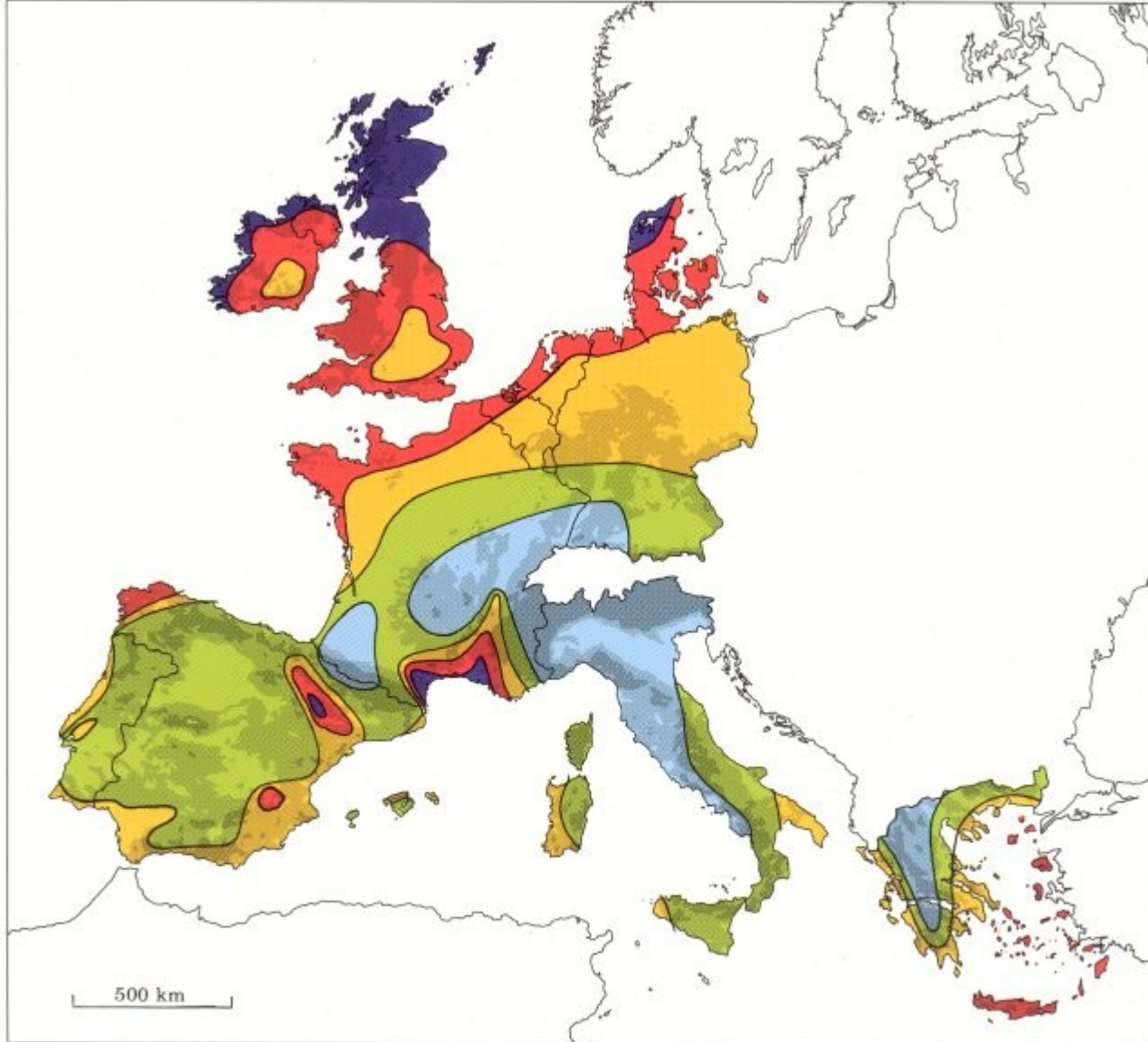
## Statistika vjetra

**Atlas vjetra** daje podatke o prosječnim (očekivanim, srednjim) brzinama vjetra na promatranoj lokaciji [m/s], kao i očekivanoj snazi energije dostupnoj po jedinici površine [W/m<sup>2</sup>]

Pogodno za određivanje makrolokacije za smještaj VE.

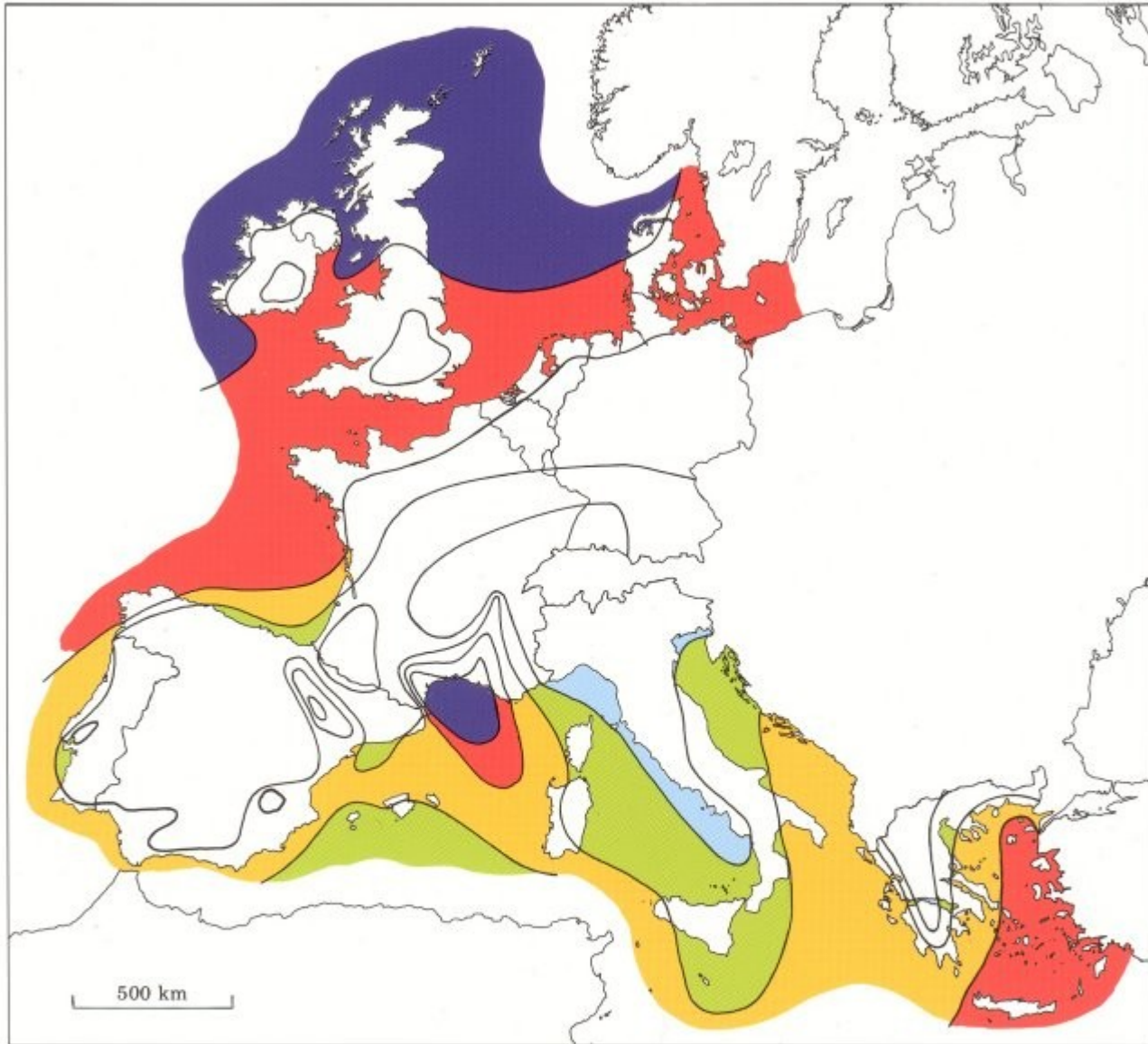
**Europski atlas vjetra  
1989.**

**(na kopnu, na visini od  
50 m, za različite terene)**



Wind resources <sup>1</sup> at 50 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain <sup>2</sup>		Open plain <sup>3</sup>		At a sea coast <sup>4</sup>		Open sea <sup>5</sup>		Hills and ridges <sup>6</sup>	
	m s <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	m s <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	m s <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	m s <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	m s <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>
Dark Purple	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
Red	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
Yellow	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
Light Green	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
Blue	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

# Energija vjetra

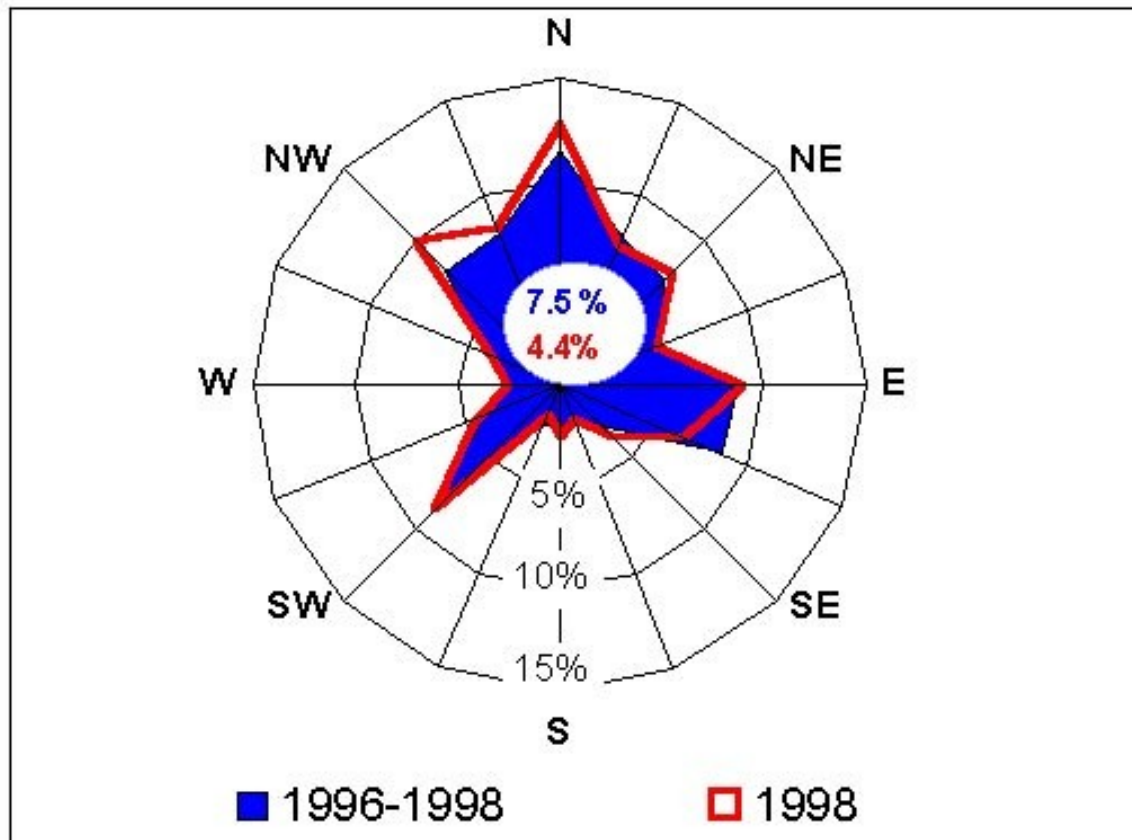


**Europski atlas vjetra  
1989.  
(na pučini – više od 10 km  
od obale, na različitim  
visinama)**

Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights										
	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>	ms <sup>-1</sup>	Wm <sup>-2</sup>
Dark Blue	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Yellow	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
Green	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
Light Blue	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

## Statistika vjetra

**Ruža vjetrova** – razdioba vjerojatnosti pojave (kontingencije) vjetra određen brzine u određenom smjeru nastala mjerenjima i/ili korelacijom na određenoj **mikrolokaciji**)

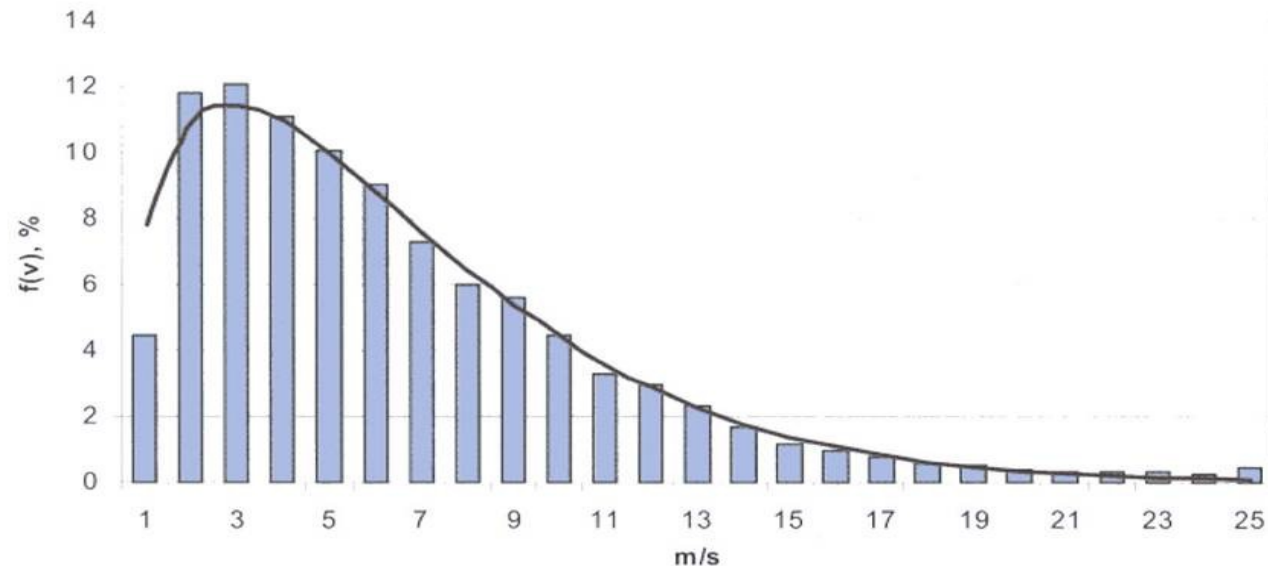


**Ruža vjetrova**  
**primjer:**  
**Splitska zračna**  
**luka**

## Statistika vjetra

“**Klasična**” **razdioba vjerojatnosti (učestalosti)** pojave vjetra određene brzine na mikroloaciji iz statistike - nadomješta se matematičkom razdiobom (npr. Weibull-ovom)

Primjer: Vjetroelektrana Ravne na otoku Pagu

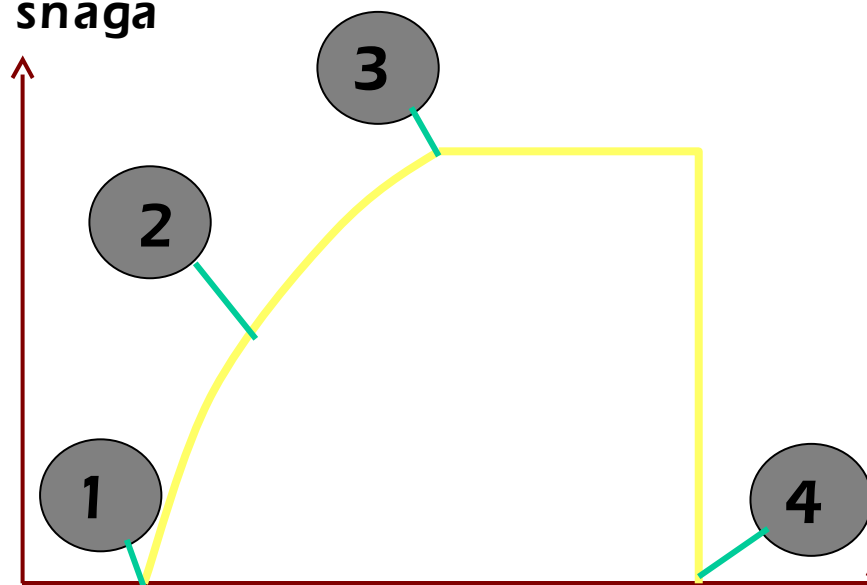


6.7. Statistika izmjerenih podataka i Weibullova razdioba.

## Krivulja snage u ovisnosti o brzini vjetra

- Graf koji nam pokazuje koliku će snagu i kako razviti turbina na različitim brzinama vjetra je krivulja snage.
- Brzina uključenja - tromost VE; brzina isključenja - dinamička naprezanja

El. snaga

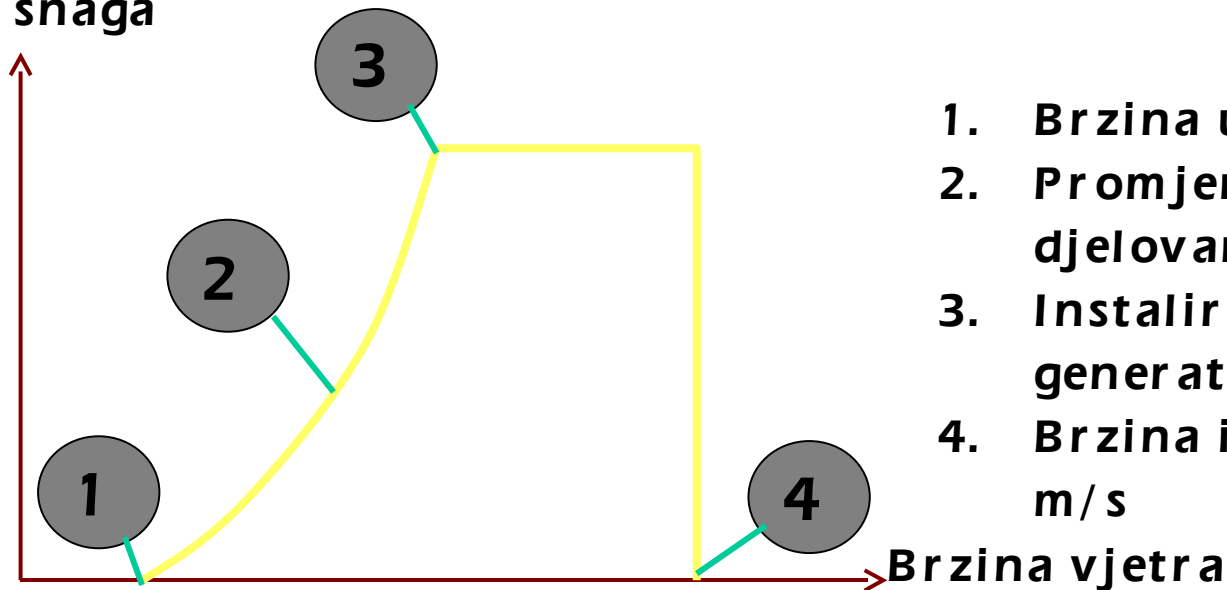


1. Brzina uključenja: oko 3-5 m/s
2. Promjena stupnja djelovanja
3. Instalirana snaga generatora
4. Brzina isključenja: oko 25 m/s

## Krivulja snage u ovisnosti o brzini vjetra

- Graf koji nam pokazuje koliku će snagu i kako razviti turbina na različitim brzinama vjetra je krivulja snage.
- Brzina uključjenja - tromost VE; brzina isključenja - dinamička naprezanja

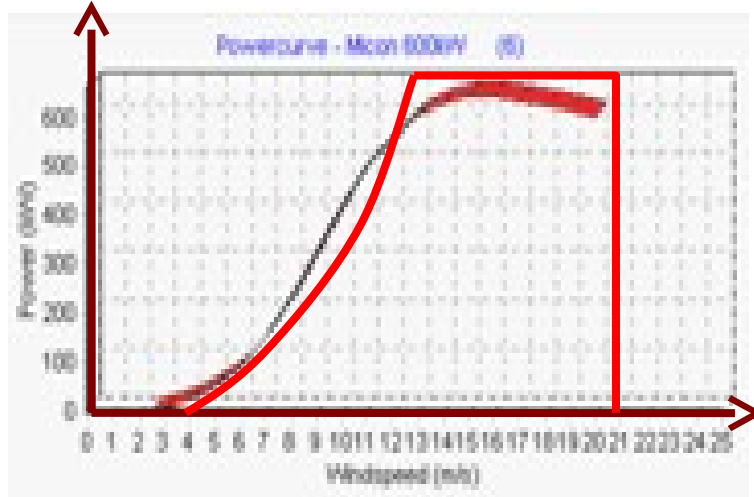
El. snaga



1. Brzina uključjenja: 3-5 m/s
2. Promjena stupnja djelovanja
3. Instalirana snaga generatora
4. Brzina isključenja: 25-30 m/s

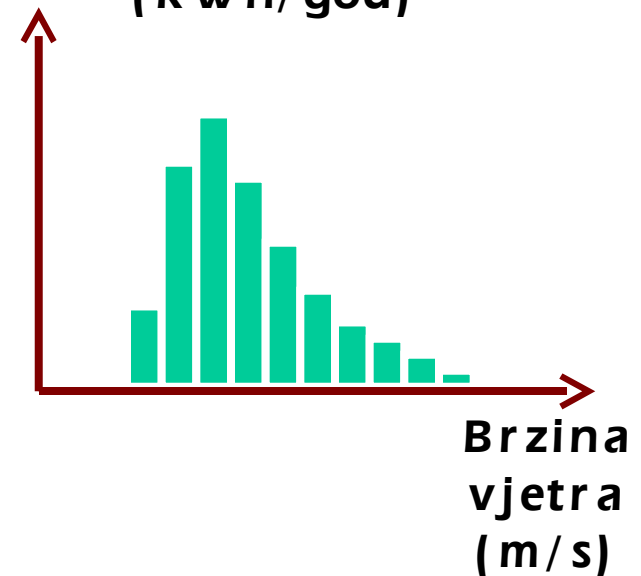
# Energija vjetra

Snaga (kW)



Procjena proizvodnje energije

Očekivana godišnja  
proizvodnja  
(kWh/god)

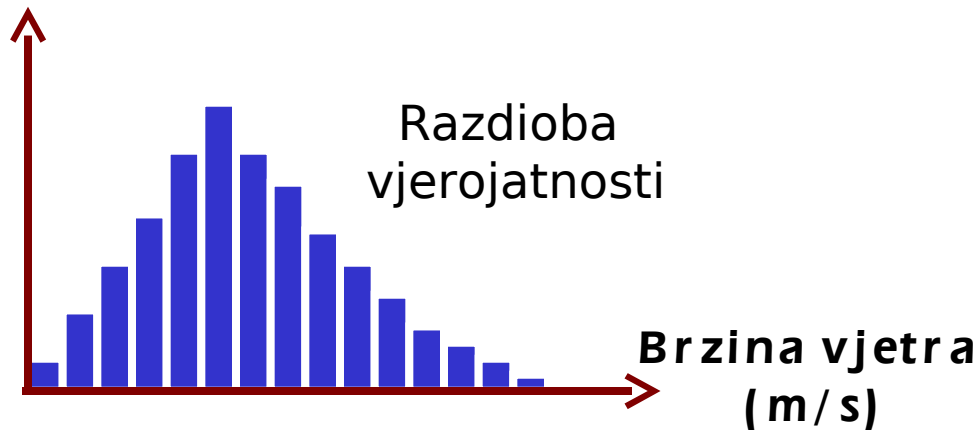


Brzina  
vjetra  
(m/s)

=

Sati/god.

**X**



## *Utjecaj terena na izbor lokacije*

- *Na većini mjesta na svijetu danju je vjetrovitije nego noću. Vjetar je mnogo turbulentniji danju češće mijenja smjer. Veća proizvodnja danju je prednost jer je i potrošnja danju veća. Snažne oluje često su popraćene čestim udarima vjetra koji naglo mijenjaju smjer i brzinu vjetra.*

## *Kopno*

- *Na velikim visinama od oko 1 km, površina zemlje ne utječe previše na vjetar, dok u nižim slojevima atmosfere **trenje o površinu zemlje jako utječe na brzinu vjetra**. Za veće nepravilnosti terena, vjetar je više usporen.*
- *Primjerice šume i veliki gradovi, logično će više usporiti vjetar, dok će velike betonske površine tek neznatno utjecati na brzinu vjetra.*
- *Vodene površine su još više ugladjenije od betonskih imaju još manji utjecaj, dok visoka trava i grmlje imaju znatan utjecaj na brzinu vjetra.*  
**Dobra lokacija za zračne turbine je stoga duž obale.**



- ***Litica stvara turbulenciju i usporava vjetar*** čak i prije nego što dolazi do same litice, te znatno smanjuje životni vijek turbine zbog jačeg trošenja uslijed turbulencije. Puno povoljnije bilo bi kada bi ***litica bila zaobljena prema moru, jer bi u tom slučaju došlo do efekta ubrzanja vjetra.***
- ***U područjima sa nejednakim izgledom terena, i iza prepreka poput zgrada, dolazi do turbulencije sa vrlo nepravilnim tokovima vjetra i vrtlozima.***

## Pučina

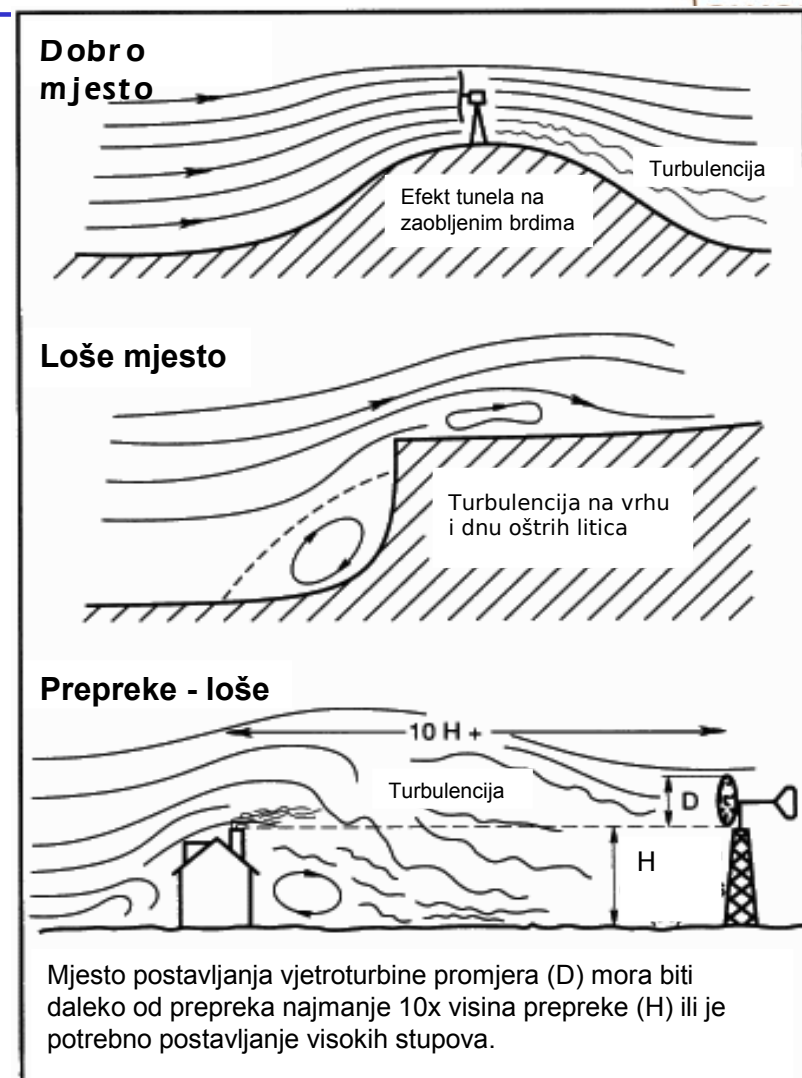
- ***Pošto je nepravilnost na morskoj površini vrlo mala, brzina vjetra se previše ne mijenja pa visina osovine turbine ne mora biti visoka kao na kopnu.***
- ***Najekonomičnija visina osovine turbine smještene na površini mora je 0,75 puta promjer rotora. Vjetar na moru je manje turbulentan nego na kopnu, zato turbine na moru imaju veći životni vijek od onih na kopnu.***



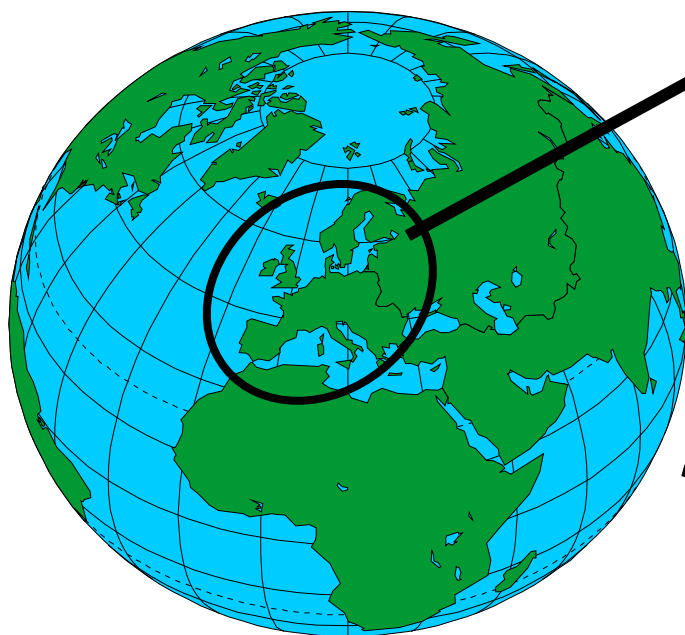


## Utjecaj terena na izbor lokacije

- Na vjetrovitoj strani zgrada ili planina, zrak se komprimira i njegova se brzina između prepreka znatno povećava. Ta je pojava znana kao „**efekt tunela**“.  
Tunel bi trebao biti što pravilniji.
- **Vjetroturbine su udaljene između 5 do 9 dužina promjera rotora u smjeru dolaska vjetra i između 3 do 5 dužina promjera rotora u smjeru okomitom na smjer vjetra.**
- Gubitak energije zbog zavjetrine koje stvaraju jedna drugoj iznosi negdje oko 5 %, no iskoristivost zemljišta i cijena spajanja turbina na električnu mrežu, traže da ih smjestimo što bliže



## Energija vjetra - potencijal



### Europa

	TWh/god
kopno	500
pučina	2000
potrošnja <sup>(1)</sup>	3000

### Svijet

	TWh/god
potencijal <sup>(2)</sup>	25.000
potrošnja <sup>(1)</sup>	20.000

- 1) Trenutno približno
- 2) Samo kopno!

## Vjetroelektrane - osnovna podjela

### Male

1 ~ 30 kW



Daleka izolirana mjesta.  
Raznolikost rješenja.

### Srednje i velike

30 ~ 1500 kW



Na mreži:  
samostalne ili u grupi.  
Od 650 kW posve  
komercijalne i velikih  
serija.

### Pučina\_

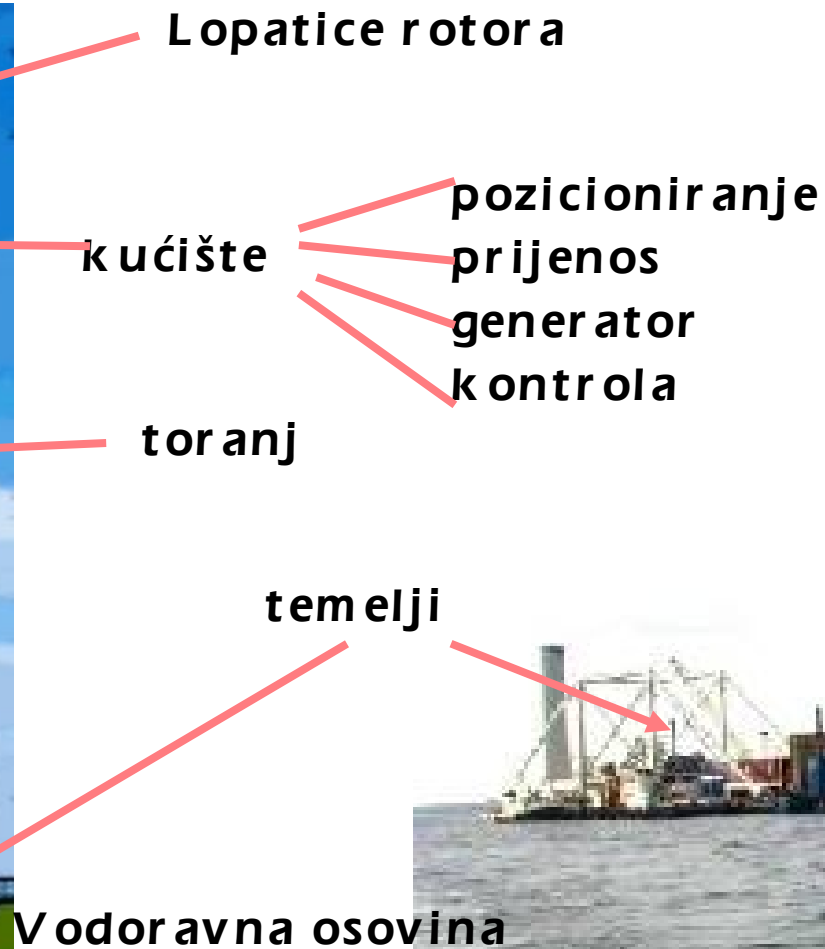
> 1500 kW



Na pučini (stotine MW).  
Razvija se.

# Energija vjetra

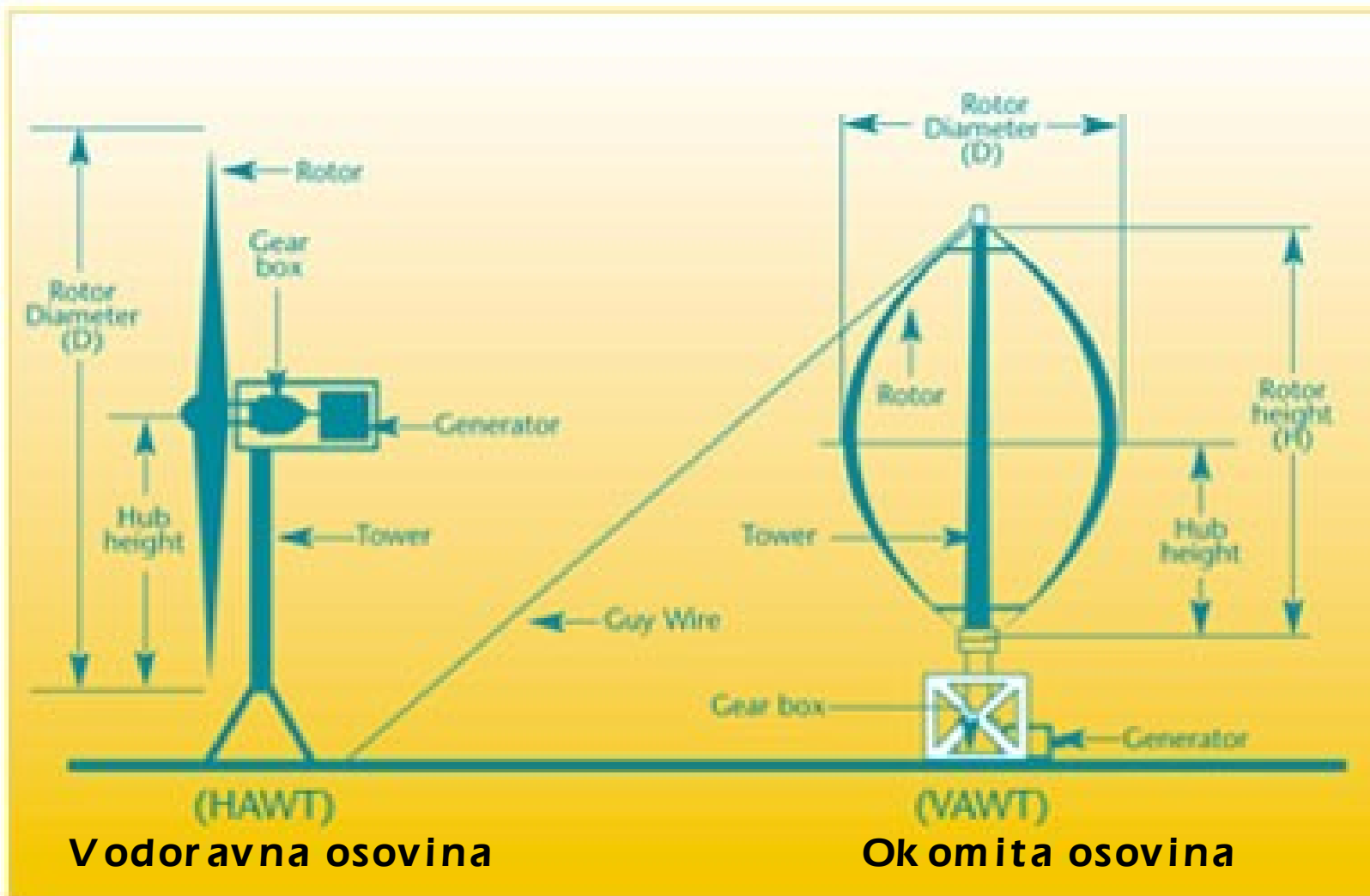
## Osnovni tipovi vjetroelektrana



Okomita osovina



# Osnovni tipovi vjetroelektrana



## ***Prednosti vjetroelektrana sa horizontalnom osovinom:***

- *U stanju su dobro iskoristiti veću brzinu vjetra na visini*
- *Veći stupanj djelovanja od većine vjetroelektrana sa vertikalnim osovinama*
- *Mogućnost mijenjanja ulaznoga kuta rotora (povećava efikasnost i olakšava regulaciju brzine)*

## ***Nedostaci vjetroelektrana sa horizontalnom osovinom:***

- *Skupi tornjevi većih visina*
- *Vibracije pri radu*
- *Potreba za neprekidnim rotiranjem "u vjetar"*
- *Složenost*
- *Nezgodno održavanje visokih vjetroelektrana sa horizontalnom osovinom (položaj kućišta i generatora!?)*



# Energija vjetra



Bonus 2 MW,  
promjer rotora je 72  
metra.



Nordex 2,5 MW ,  
promjer rotora turbine je 80 metara.



Vestas 1650 kW ,  
promjer rotora od  
63metra.



Lagerway 750 kW



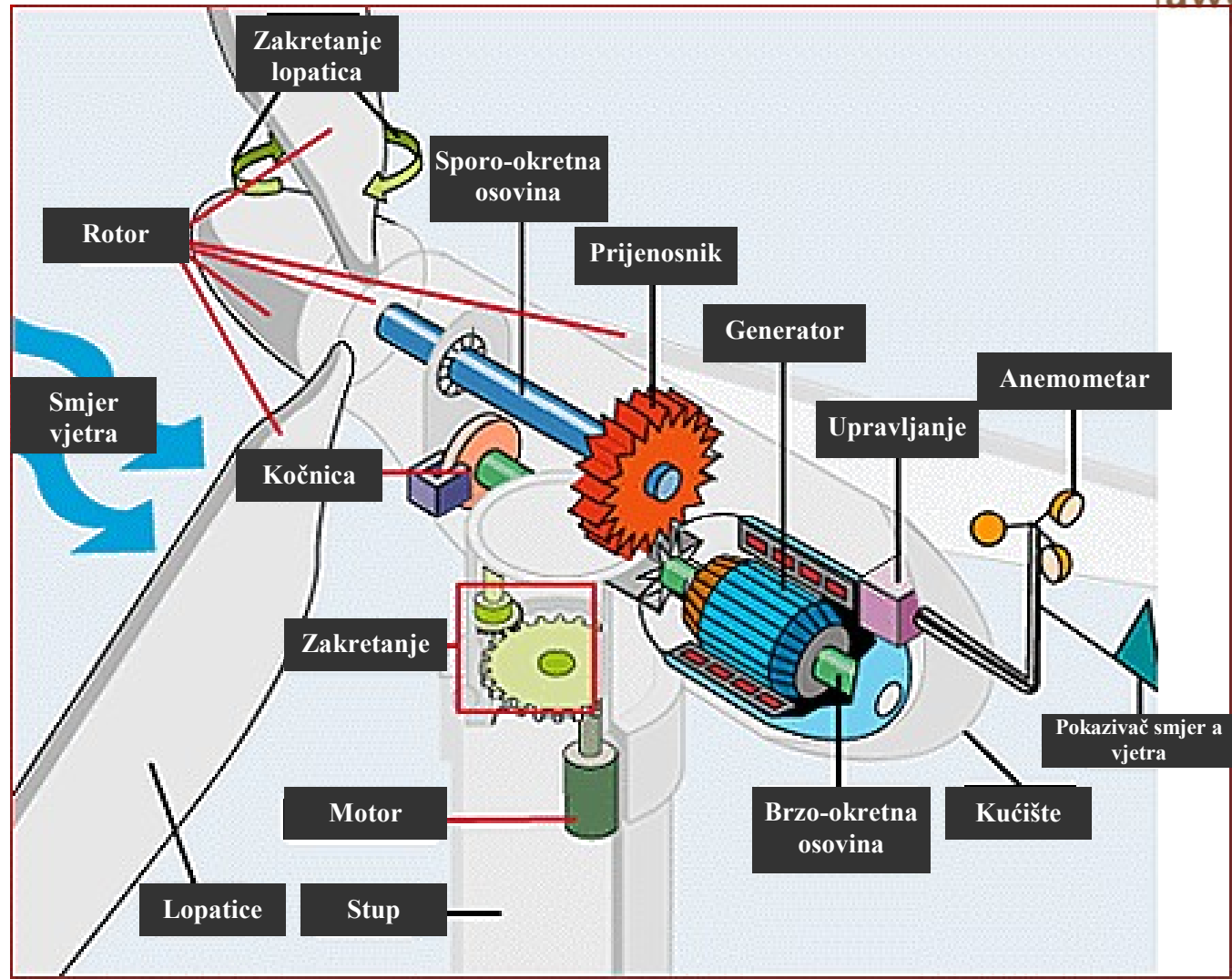
NEG Micon 2 MW,  
promjer rotora te turbine je 72 metra.



HSW 1000kW

# Energija vjetra

## Osnovni dijelovi VE



- **Lopaticice** (eng. blades)

S obzirom na izvedbu možemo razlikovati:

1. **lopaticice sa zakretnim vrhovima** (kao aerodinamičnim kočnicama) ili
2. **lopaticice s krilcima** (funkcioniraju na način da se krilca odvajaju od površine, smanjujući aerodinamične značajke profila kod brzine iznad projektne).

Obje izvedbe su ujedno sekundarni kočni sustavi, koji u slučaju otkaza primarnog kočnog sustava (mehanička kočnica) stvaraju moment kočenja (zakretanjem vrha lopaticice ili pomičnom ravnom površinom (eng. spoiler)).

- **Ako se u obzir uzmu razina buke i vizualni efekt, izvedba s tri lopaticice predstavlja najčešće rješenje (oko 90%).**
- Pored toga, **dinamikom rotora s tri kraka je najlakše upravljati**. Inercijski moment trokrakog rotora prema tornju ne mijenja se tijekom okretanja. To rezultira manjim problemima uslijed oscilacija nego kod jednokrakih i dvokrakih rotora. Uz to je i **optički mirniji zbog okretanja na manjoj brzini**.



- **Rotor**

Sastavni dijelovi rotora vjetroturbine: *glava (eng. hub) i lopatice*. Ovisno o tome kako reguliramo snagu, rotor može biti izveden:

1. Tako da se *regulacija kuta tijekom rada vrši zakretanjem lopatice*, na način da se profil namješta u optimalni položaj (eng. Pitch).

Ovakva regulacija je složena i rotor ovakve izvedbe su skuplji, ali nužno primjenjivi za lopatice duže od 25-30 m. Također postoji poseban motor za zakretanje, koji mijenjajući kut lopatice mijenja napadni kut struje zraka.

2. Tako da se *regulacija snage vjetroturbine vrši korištenjem aerodinamičnog efekta poremećenog trokuta brzina* (eng. stall).

Dakle, s promjenom brzine vjetra mijenja se na aeroprofilu kut struje zraka, odnosno dolazi do poremećaja trokuta brzina te do porasta ili gubitaka uzgona. Za ovaj slučaj izvedbe rotora lopatice nemaju mogućnost zakretanja. Međutim, kako je vjetroturbina projektirana za neko područje brzina, u ovom slučaju izvedbe lopatice imaju unaprijed namješten kut za dotično područje brzina, što omogućuje najveću transformaciju energije vjetra u el. energiju.



- **Kočnica (eng. brake)**

*Kada generator ispadne iz mreže, odnosno brzina naleta vjetra prijeđe maksimalnu vrijednost (isključnu vrijednost, npr. 25 m/s) dolazi do izrazitog dinamičkog opterećenja. Zato mora postojati kočni sustav kako bi rasteretio prijenosnik snage, odnosno zaustavio rotor.*

*Zadatak ovog sustava je održati projektnu brzinu vrtnje konstantnom, odnosno osigurati sustav čije je djelovanje dinamički uravnoteženo.*

*Disk kočnica je najčešća izvedba kočnog sustava (kojom se na suvremenim strojevima upravlja mikroprocesorski), a smještena je na sporookretnoj osovini prije prijenosnika ili na brzookretnoj osovini generatora.*



- **Prijenosnik snage (eng. gear box)**

Prijenosnik vjetroturbine *spaja sporookretnu s brzookretnom osovinom i povećava brzinu vrtnje s oko 30 – 60 o/min na oko 1200 – 1500 o/min tj. na brzinu vrtnje, za većinu generatora, nužnu za stvaranje električne energije.*

*Prijenosnik je u većini slučajeva multiplikator i može biti različitih izvedbi.*

*Hlađenje prijenosnika se najčešće vrši zrakom, a podmazivanje sintetičkim uljem. Prilikom analiziranja načina na koji se vrtnja prenosi s vjetroturbinskog dijela na električni generator, naročitu važnost zauzimaju materijali izrade elemenata sklopa, vrsta prijenosa i prijenosni omjer. Prijenosnik je skup i težak dio vjetroturbine pa zbog toga inženjeri istražuju mogućnost izravnog pogona generatora bez prijenosnika.*

- *Postotak iskoristivosti energije je 98%, a gubitak energije koji nastaje uslijed trenja zupčanika prijenosnika manifestira se u obliku topline i buke.*
- *Ukoliko su generatori višepolni niskobrzinski i po mogućnosti sinkroni s uzbudnim namotom ili uzbudnim permanentnim magnetima, mehanički prijenosnik nije potreban (slučaj kod vjetroturbina novijeg dizajna).*



- **Upravljački i nadzorni sustav (eng. controller)**

*Mikroprocesorski upravljani sustav je u osnovi zadužen za cjelokupno upravljanje i nadziranje rada vjetroturbinsko-generatorskog sustava.*

*Ako ovakav sustav nije u cijelosti smješten na vjetroturbinskoj jedinici (kao što može biti slučaj), već je jednim dijelom na nekom udaljenijem mjestu onda sustav zahtjeva i posebnu telekomunikacijsku opremu.*

- **Oprema za zakretanje (eng. yaw gear)**

*Služi za zakretanje turbinsko-generatorskog sustava. Nalazi se ispod kućišta vjetroturbine, na vrhu stupa. Preko pužnog prijenosa (omjera reda veličine 1:1000) s velikim zupčastim prstenom, učvršćenim na stupu, izravnavava se os osovine rotora s pravcem vjetra. **Zakretanje vrši motor.** On na sebi ima ugrađenu kočnicu koja onemogućuje zakretanje kućišta zbog naleta vjetra.*

*Zakretanje kućišta regulira sustav koji je izvan funkcije kad su poremećaji smjera vjetra manji (u prosjeku - jednom u deset minuta dogodi se zakretanje kućišta).*



- **Kućište (eng. nacelle)**

*Kućište s jedne strane štiti generatorski sustav sa svim komponentama od okolišnih utjecaja, a s druge štiti okoliš od buke dotičnog sustava.*

- **Stup (eng. tower)**

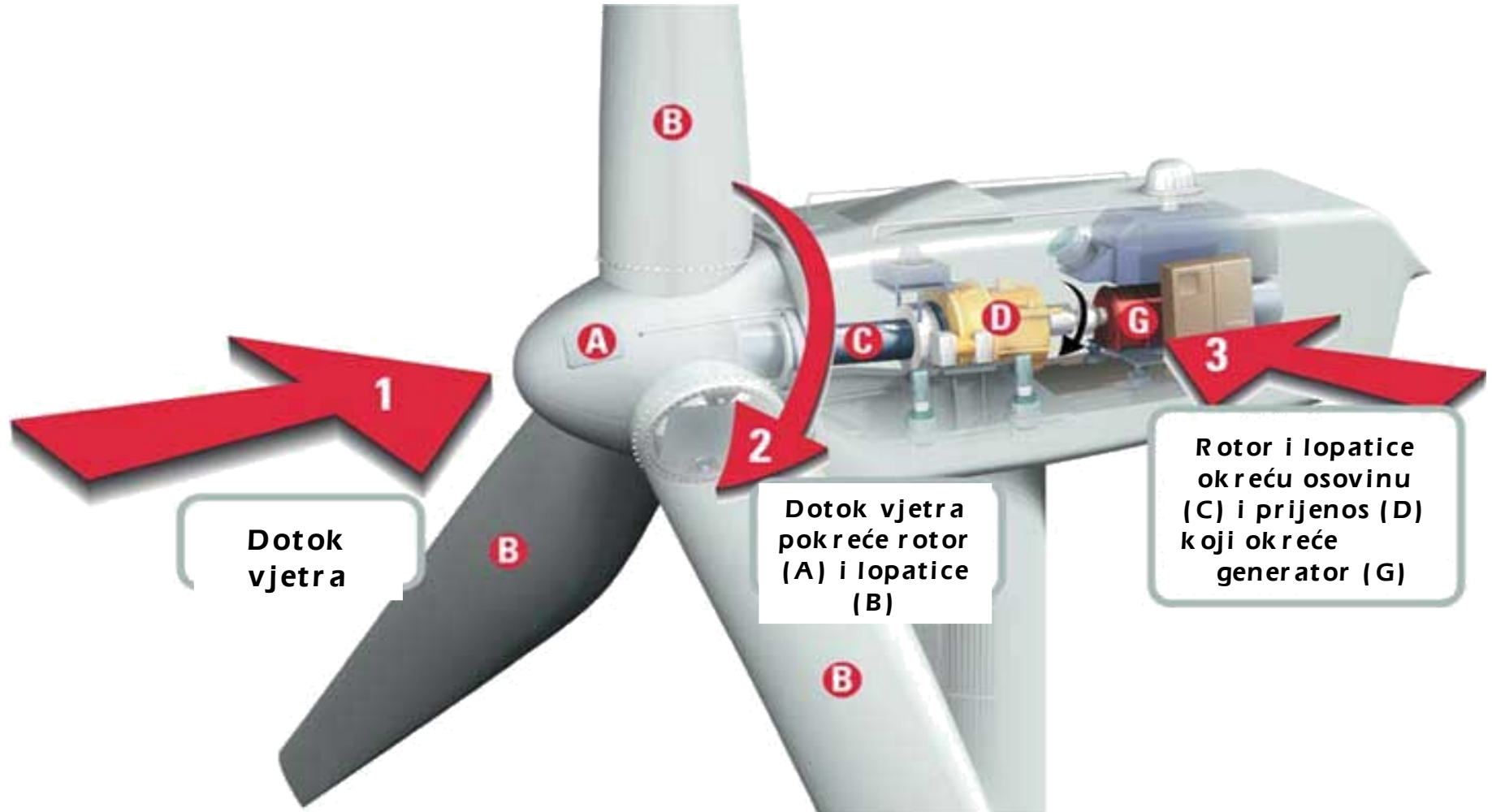
*Može biti izveden kao **cjevasti, konusni, teleskopski, rešetkasti, učvršćeni ili povezani.***

***Danas se najčešće koristi cjevasta konstrukcija,** a prednost joj se nalazi u tome što ju osim visoke čvrstoće karakterizira i veća otpornost na vibracije.*

*Prednost rešetkaste konstrukcije nalazi se u jednostavnosti, a budući da ju je moguće rastaviti na manje dijelove prikladnija je za transport i montažu.*

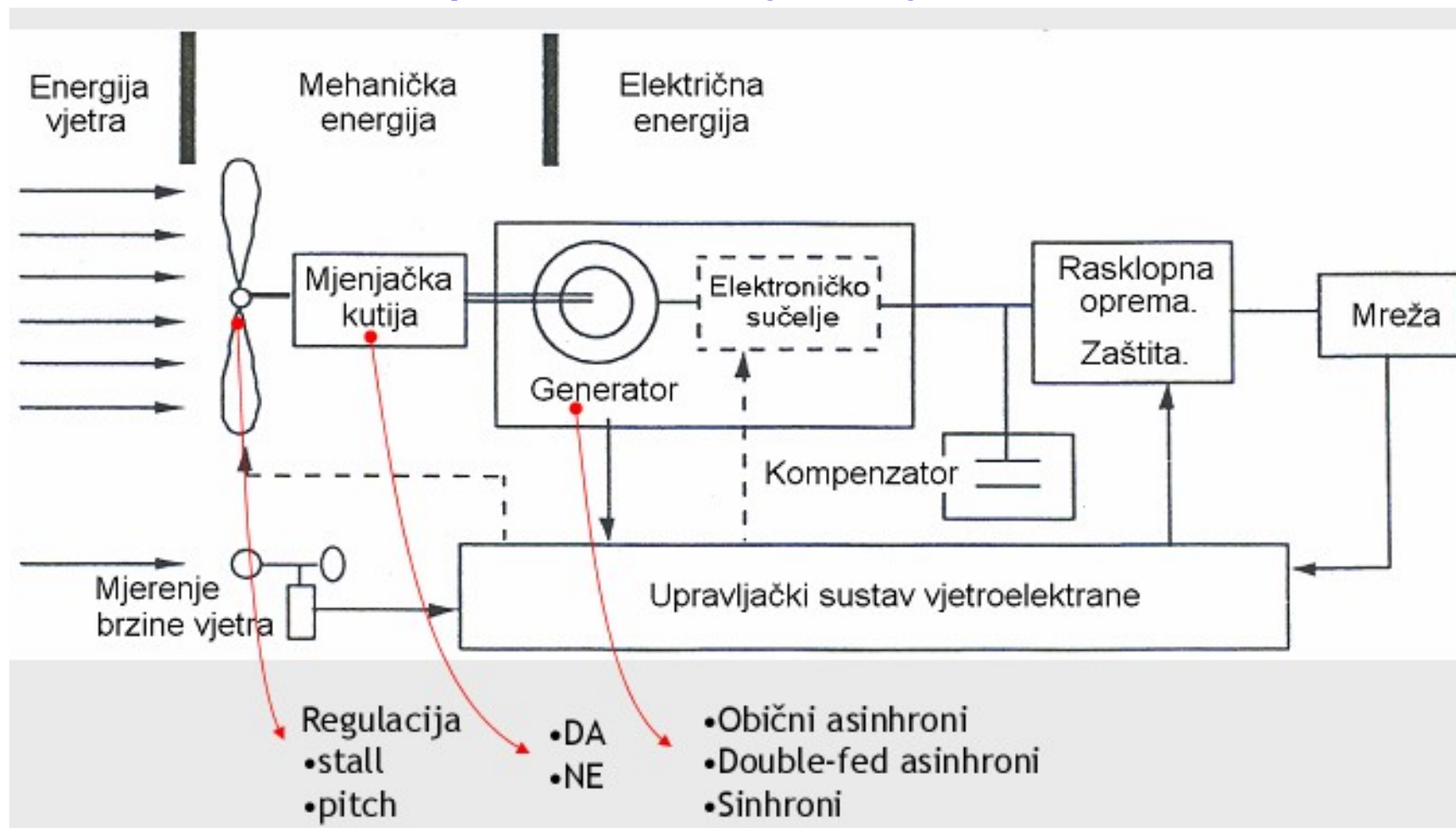


## Osnovni princip rada vjetroturbine



# Energija vjetra

## Općenita shema djelovanja VE



- **Generator**

*Za pravilno i sigurno funkcioniranje čitavog vjetroturbinsko - generatorskog sustava, generator mora ispunjavati zahtjeve kao što su:*

- 1. visok stupanj iskoristivosti u širokom krugu opterećenja i brzine okretanja,*
- 2. izdržljivost rotora na povećanim brojevima okretaja u slučaju otkazivanja svih zaštitnih sustava,*
- 3. izdržljivost, odnosno postojanost konstrukcija na visokim dinamičkim opterećenjima prilikom kratkih spojeva, te pri uključivanju i isključivanju generatora.*
- 4. Uzimajući u obzir uvjete povećane vlažnosti, slanosti, zatim otpornost na krute čestice, povišenu temperaturu i slične uvjete, pred generatore se također postavlja zahtjev pouzdanosti sa što je moguće manje održavanja.*



## Izbor generatora u vjetroelektrani

### 1. VE u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje

- *Prednost: Za izravno priključenje na mrežu, omogućena primjena jednostavnih generatora čija je brzina vrtnje određena frekvencijom mreže.*
- *Nedostatak: optimalan pogon (maks. djelatnu snagu) samo za jedan omjer između brzine vrha elise i brzine vjetra.*

#### ASINKRONI GENERATOR

##### **Priključak VE na krutu mrežu.**

Prednost:

jednostavnija i jeftinija konstrukcija,  
lakše održava sinkronizam

Nedostatak:

potreban **kompensacijski uređaj**  
(uglavnom kondenzatorske baterije) i  
priključni uređaj za početnu  
sinkronizaciju s mrežom (eng. **soft-  
starter**).

#### SINKRONI GENERATOR

##### **Očekivani otočni pogon VE.**

Prednost:

Veći stupanj djelovanja i pouzdanosti.

Nedostatak: teško održava  
sinkronizam, potreban **uzbudni  
sustav i regulator brzine**

koji će održavati napon i frekvenciju.

Ne mogu se pronaći u komercijalnim  
izvedbama u pogonu na krutu mrežu.

## *2. VE u izvedbi s promjenjivom brzinom vrtnje*

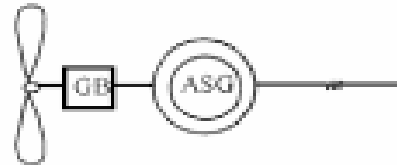
- *Kod VE koje se spajaju na mrežu zahtijevaju se **pretvornici frekvencije**.*
  - *Sinkroni generator s pretvaračem u glavnom strujnom krugu*
  - *Asinkroni generator s pretvaračem u glavnom strujnom krugu*
  - *Asinkroni generator s upravljivim promjenjivim klizanjem*
  - *Asinkroni generator s nadsinkronom ili podsinkronom pretvaračkom kaskadom*
- **Prednosti:**
  - *Ostvariv je optimalan pogon za svaki omjer između brzine vrha elise i brzine vjetra, odnosno za svaku brzinu vjetra.*
  - *Pogon s promjenjivom brzinom vrtnje na godinu postiže i do 30% veći iznos predane električne energije od pogona sa stalnom brzinom vrtnje.*



- **Nedostaci:**
  - *Na električnoj strani VE povećani početni investicijski troškovi zbog složenije izvedbe priključenja na mrežu (kod sinkronog generatora - statički pretvarač frekvencije zasnovan na energetskej elektronici; kod asinkronog - diodni ispravljač u mosnom spoju) - povećanje ukupne harmoničke distorzije*
  - *Na mehaničko-hidrauličkoj strani troškovi smanjuju jer se regulacije brzine vrtnje agregata više ne izvodi na turbini čime ona postaje jeftinija, no ukupno je cijena veća.*
- *Ako je cijena isporučene energije dovoljno visokog iznosa, moguće je postići ekonomsku isplativost i uz veće početne investicijske troškove pogona s promjenjivom brzinom vrtnje.*

## ASINKRONI GENERATORI

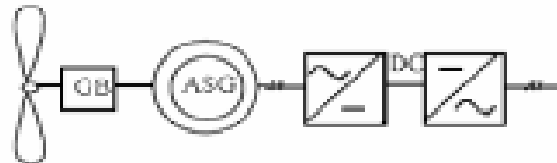
- izravno priključenje na mrežu



$$n = (1-s) f_p \quad s = 0 \dots 0.08$$

potrošač induktivne jalove snage

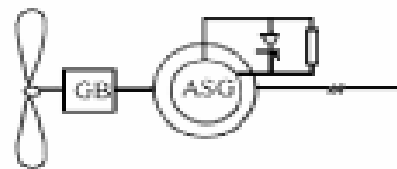
- mrežni priključak putem DC veze



$$n = 0.8 \dots 1.2 f_p$$

upravljiva izlazna jalova snaga uz odgovarajući pretvarač

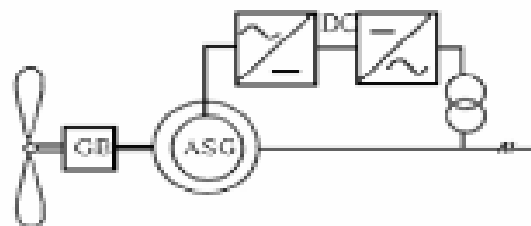
- dinamički upravljivo klizanje



$$n = (1-s) f_p \quad s = 0 \dots 0.1 \dots 0.3$$

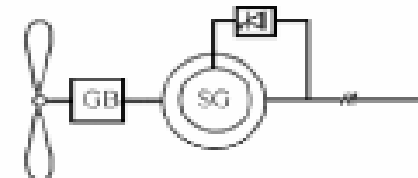
potrošač induktivne jalove snage

- asinkroni generator s dvostranim napajanjem



## SINKRONI GENERATORI

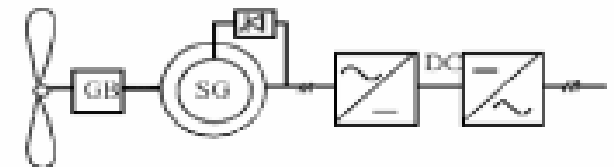
- izravno priključenje na mrežu



$$n = f_p$$

upravljiva izlazna jalova snaga

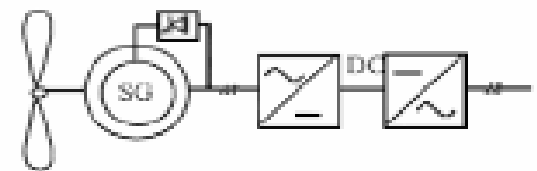
- mrežni priključak putem DC veze



$$n = 0.5 \dots 1.2 f_p$$

upravljiva izlazna jalova snaga uz odgovarajući pretvarač

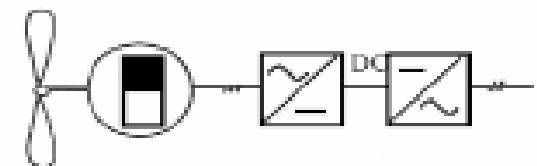
- mrežni priključak putem DC veze, bez mjenjačke kućije



$$n = 0.5 \dots 1.2 f_p$$

upravljiva izlazna jalova snaga uz odgovarajući pretvarač

- PMSG priključen putem DC veze



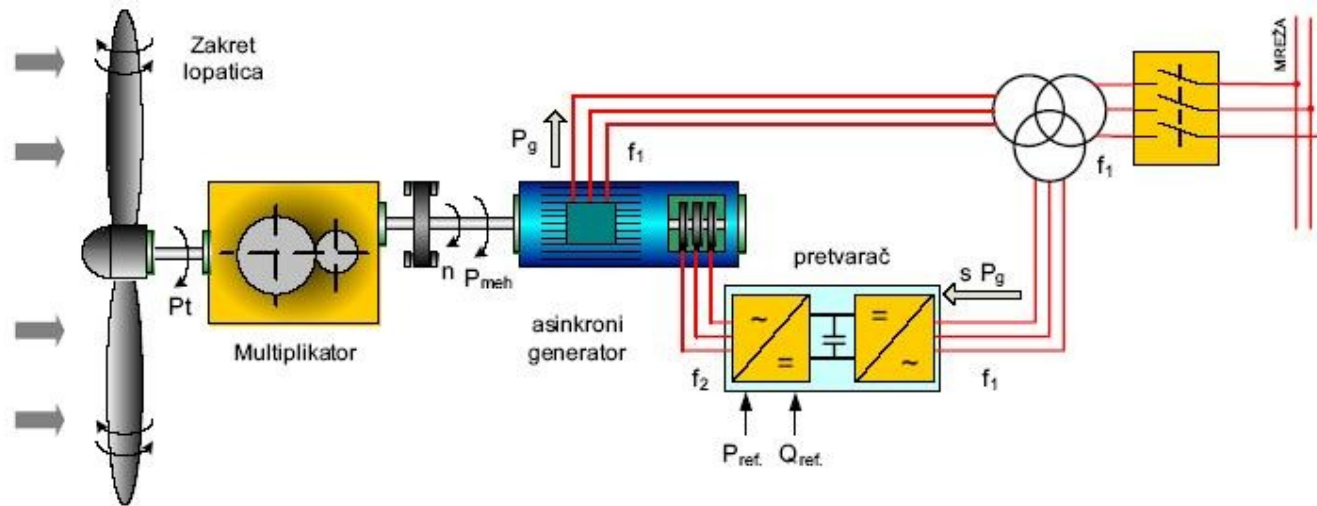
$$n = 0.6 \dots 1.2 f_p$$

upravljiva izlazna jalova snaga uz odgovarajući pretvarač

**Načini priključenja  
VE na mrežu**

gospodarstvo

## Dvostrano napajani asinkroni (indukcijski) generator



### Prednosti

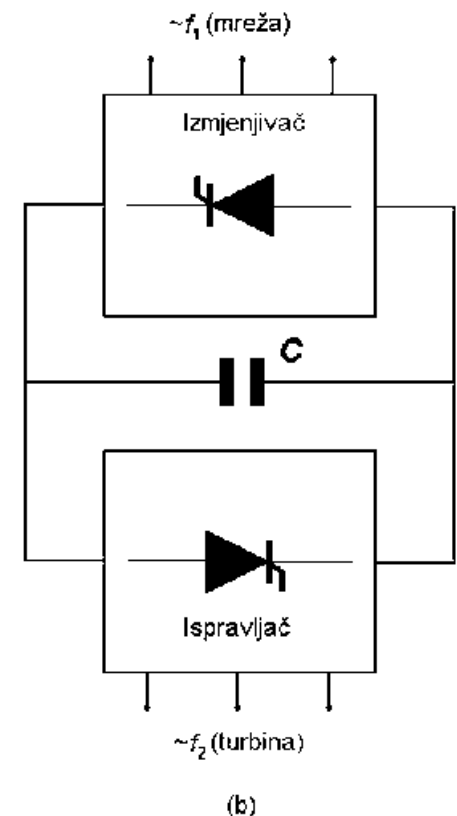
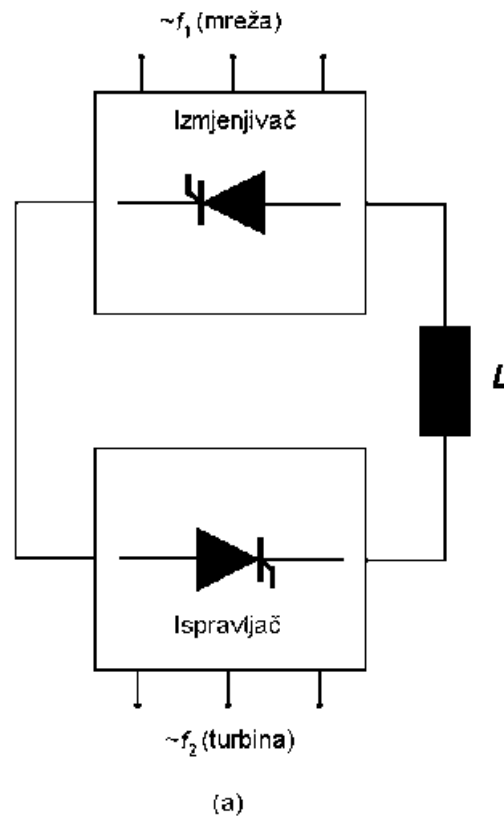
- bitno smanjena snaga i cijena pretvarača
- mogućnost regulacije brzine vrtnje (tipično  $\pm 20-25\%$ ) za optimalno korištenje energije
- jalova snaga za magnetiziranje stroja iz pretvarača
- moguć podsinkroni i nadsinkroni rad

### Nedostaci

- klizni koluti i četkice, trošenje i održavanje
- složeno upravljanje agregatom
- otežan izravni spoj na mrežu

## Samokomutirajući pretvarači za VE

- **Kontrola frekvencije i napona.**
- **Relativno dobro definiran sklopni valni oblik napona i valni oblik struje na priključcima generatora i mreže.**
- **Spremnik energije: zavojnica  $\gg L$ , odnosno kondenzator  $\gg C$  održavaju konstantim struju, odnosno napon.**



Pretvarač sa strujnim izvorom

Pretvarač s naponskim izvorom

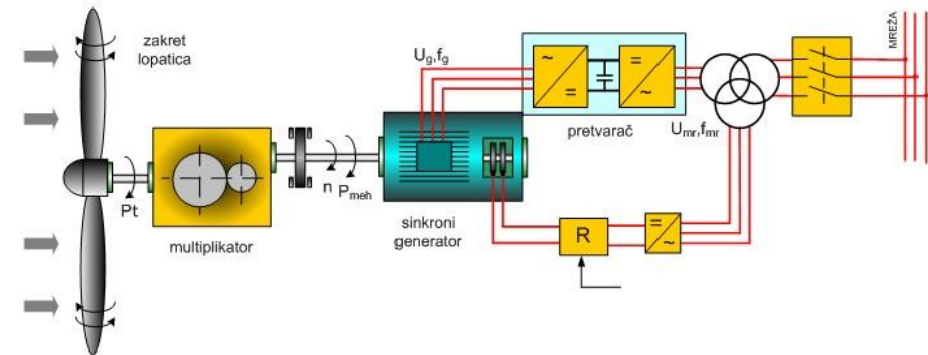
## *Prednosti i nedostaci u korištenju energetske elektronike u VE*

Svojstva energetske elektronike	Prednosti	Nedostaci
Regulirana frekvencija (važno za vjetroelektrane)	- optimalno iskorištavanje energije	- veći troškovi
	- manje mehaničko naprezanje	- dodatni gubitci
	- kontrola tereta	
	- mogućnost rada bez reduktora	
	- smanjena buka	
Karakteristike elektrane (važno za mrežu)	- Kontrolirana radna i jalova snaga	- visoki harmonici
	- lokalni izvor jalove snage	
	- poboljšana stabilnost mreže (napona)	
	- smanjena razina treperenja	
	- filtrirani niski harmonici	
	- ograničena snaga kratkog spoja	

## Izbor generatora – različiti pogledi

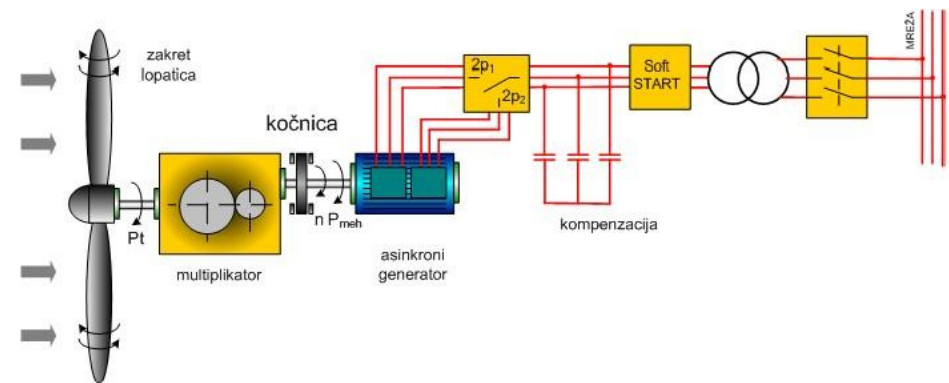
- **Sa stajališta mreže (HEP-a):**

- *Kombinirana primjena generatora s promjenjivom brzinom vrtnje i statičkog pretvarača frekvencije pomaže u izbjegavanju problema stabilnosti kuta i regulacije frekvencije, odnosno njihanja općenito.*
- *Problemi sa stabilnošću mogući jedino pri priključenju takve VE kao izvora konstantne djelatne snage na naponski slabu mrežu.*



- **Sa stajališta investitora:**

- *Investitori se uglavnom odlučuju za inicijalno jeftiniju varijantu, dakle za vjetroelektrane u izvedbi sa stalnom brzinom vrtnje i frekvencijom uz korištenje asinkronog generatora u pogonu na krutu mrežu.*



## Izbor mehaničkog sustava – različiti pogledi

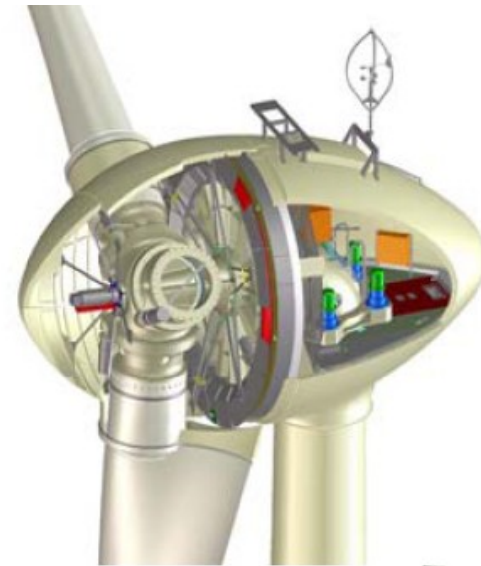
### Prednosti i nedostaci u korištenju prijenosnika:

#### 1. Izravan pogon (bez prijenosnika):

- Robustna konstrukcija
- Težak i skup generator
- primjer: VE Končar KO-VA 57/1

#### 2. Nezravan pogon (prijenosnik):

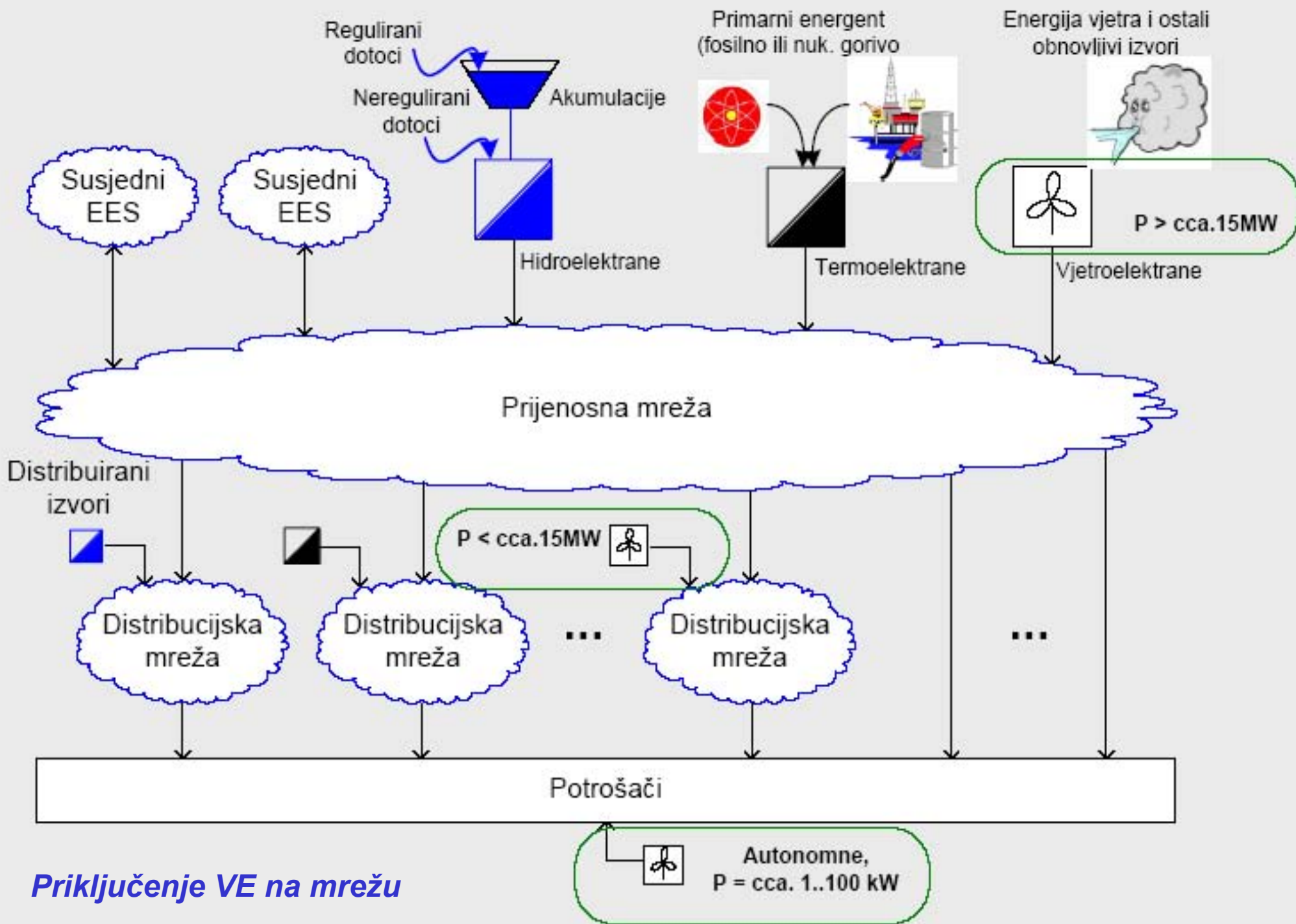
- Težak i skup prijenosnik
- Problemi s održavanjem
- Primjer: VESTAS, NORDEX...



## Kriteriji priključenja vjetroelektrane na mrežu

- Priključenje VE na elektroenergetsku mrežu je **značajan problem** obzirom na to da vjetroelektrane mogu **bitno utjecati na stabilnost sustava i kvalitetu električne energije u mreži**.
- Kriteriji priključenja se definiraju u obliku **Mrežnih pravila za vjetroelektrane** (eng. wind grid codes).
- Problem: iako se Mrežna pravila ne izrađuju na način da isključe ili diskriminiraju određenu vrstu generatora, njihove su **odredbe obično definirane imajući u vidu konvencionalne TE i HE**.
- Vjetroturbinski (u pravilu asinkroni) generatori se znatno razlikuju od sinkronih generatora zbog čega se uobičajeno izrađuju **dvije vrste Mrežnih pravila za vjetroelektrane**:
  1. Za priključenje na prijenosni sustav (nazivni napon  $\geq 110$  kV),
  2. Za priključenje na distribucijski sustav (nazivni napon  $\leq 35$  kV).





- *Neki od najvažnijih tehničkih kriterija priključenja VE na mrežu koji se uzimaju u obzir zbog što kvalitetnije integracije VE u EES:*

***1. Raspon frekvencije,***

***2. Iznos napona,***

***3. Stanje u uvjetima kvara,***

***4. Kvaliteta isporučene električne energije i***

***5. Zahtjevi obzirom na signale, komunikacije i upravljanje***

*...*

- *Ovih pet glavnih kriterija se smatra ključnim područjima za ispravan pogon i vođenje VE u pripadajućem elektroenergetskom sustavu.*

## 1. Raspon frekvencije

- *Glavni elementi iz područja frekvencija/djelatna snaga koji se postavljaju obzirom na priključenje vjetroelektrana u sustav su:*
  - *Raspon iznosa frekvencije tijekom normalnih i poremećenih uvjeta pogona*
  - *Karakteristike vjetroelektrane u cijelom rasponu frekvencije sustava*
  - *Sudjelovanje vjetroelektrane u P-f regulaciji*
  - *Brzina promjene snage proizvodnje vjetroelektrane*
  - *Osiguravanje rezervne snage od strane vjetroelektrane*

## Raspon iznosa frekvencije

Zemlja	Njemačka	Danska	Engleska Wales	Škotska	Nizozemska	Irska
Raspon frekv.	47.5-51.5 Hz trajno od 01/01/2002	47.0-47.5 Hz tijekom 10 s 47.5-48.0 Hz tijekom 5 min 48.0-49.0 Hz tijekom 25 min 49.0-50.3 Hz trajno 50.3-51.0 Hz tijekom 1 min iznad 53.0 Hz Isključenje	47.0-47.5 Hz tijekom 20 s 47.5-52.0 Hz Trajno	47.0-47.5 Hz tijekom 20 s 47.5-50.4 Hz trajno 50.4-52.0 Hz snaga se smanjuje uz min brzinu od 2% od izlazne snage VE po 0.1 Hz odstupanja frekvencije sustava iznad 50.4 Hz.	48.0-51.0 Hz trajno	47.0-47.5 Hz tijekom 20 s 47.5-52.0 Hz tijekom 60 min 49.5-50.5 Hz Trajno snaga se mora očuvati tijekom brzine promjene frekvencije sustava od 0.5 Hz/s

## 2. Iznos napona

- *Osnovni zahtjevi vezani za napon u sustavu na koji se priključuje VE odnose se na:*
  - *raspone iznosa napona,*
  - *promjene napona,*
  - *automatsku regulaciju napona i*
  - *spособnost proizvodnje jalove energije.*
- *Operator sustava izrađuje preporuke za VE obzirom na svaki od prethodno navedenih aspekata. Pored toga postavlja i zahtjeve na ulazne energetske transformatore koji su smješteni na spoju vjetroelektrane sa sustavom.*



## Zahtjevi obzirom na raspon faktora snage vjetroelektrana

Zemlja	Njemačka	Danska	Engleska Wales	Škotska	Nizozemska	Irska
Raspon faktora snage	0.975 kap do 0.975 ind u točki priključenja od 01/01/2002.	Neutralnost obzirom na jalovu snagu u čvorištu priključenja (nulta razmjena jalove snage)	Jedinični faktor snage u točki priključenja na javnu mrežu. 0.95 kap – 0.95 ind u točki priključenja nakon 01/01/2006	Na priključnicama generatora 0.96 kap – 0.98 ind (sada za <100MW) 0.95 kap – 0.9 ind (sada za >100MW) (od 07/2003 za <100MW) 0.95 kap – 0.85 ind (od 01/2007 za sve veličine izgradnje)	0.8 kap – 0.85 ind (pretpostavlja se da se radi o čvorištu priključenja)	Isti Mvar iznos proizvodnje i potrošnje jalove snage između minimalnog i maksimalnog opterećenja, radije nego ograničavanje na temelju kap/ind faktora snage

## 3. Stanje u uvjetima kvara

- *Zahtjevi vezani uz međudjelovanje između EES i VE u slučaju pojave kvara u sustavu **iznimno su značajni**. Potrebno je poznavati utjecaj priključenja VE na sustav te njihov odziv tijekom poremećaja poput kratkih spojeva u sustavu.*
- *S povećanjem veličine izgradnje VE povećava se i značenje njihove sposobnosti prolaza kroz stanje kvara u sustavu (bez isključenja) na način što sličniji sinkronim generatorima koje nadomještavaju.*
- *Stoga se trebaju definirati sposobnosti VE kako ona ne bi imala negativan utjecaj na sustav i potrošače. Zahtijevana sposobnost VE u uvjetima pojave kvara u sustavu uobičajeno se naziva **sposobnošću prolaza VE kroz stanje kvara**.*



## Zahtjevi obzir om na sposobnost prolaza VE kroz stanje kvara a

Zemlja	Njemačka	Danska	Engleska Wales	Škotska	Nizozemska	Irska
Sposobn ost prolaza kroz stanje kvara	Od 01/01/2002 VE mora ostati priključena za propad napona na 15% od nazivnog u VN čvorištu priključka u trajanju od barem 680 ms i ostati iznad pravca oporavka napona do 3000 ms.	VE mora ostati priključena u uvjetima pojave prolaznog trofaznog KS te dvofaznog KS s neuspješnim ponovnim uključenjem voda na stanje kvara.	VE treba ostati priključena u uvjetima pojave krutog trofaznog KS na 400 kV i 275 kV razinama za ukupno vrijeme trajanja kvara u iznosu do 140 ms. Ne smije doći do gubitka snage proizvodnje.	VE treba izdržati kvarove u prijenosu (132kV i više) koji stvaraju propad napona na: 0% od 07/2005 (<30MW) 01/2004(>30MW) 15% od 01/2004 (<30MW) sada (>30MW)	VE ne smije biti isključena za propad napona na 0% u trajanju od 100 ms. Dozvoljava se 200 ms period prijelaznog oporavka iznosa napona.	VE mora biti sposobna održati pogon pri naponu sniženom na iznos od 15% u trajanju od barem 625 ms te ostati iznad pravca oporavka napona do 3000 ms.

## **4. Kvaliteta električne energije**

- *VE imaju utjecaj na korisnike sustava, posebice one koji su smješteni u njihovoj blizini, kojima treba isporučiti električnu energiju zahtijevane kvalitete. Procjena kvalitete isporučene električne energije izvodi se na temelju više aspekata od kojih su najznačajniji: emisija flikera, brze promjene napona i harmonici.*

## **5. Zahtjevi s obzirom na signale, komunikaciju i upravljanje**

- *Sustav komunikacija u/iz vjetroelektrane treba izvesti za svaku pojedinačnu VE. Vlasnik VE odgovoran je za dobavljanje signala neophodnih za vođenje pogona EES. Pored djelatne i jalove snage proizvodnje mogu se tražiti i drugi signali poput statusa VE i brzine vjetra na lokaciji njezine izgradnje*



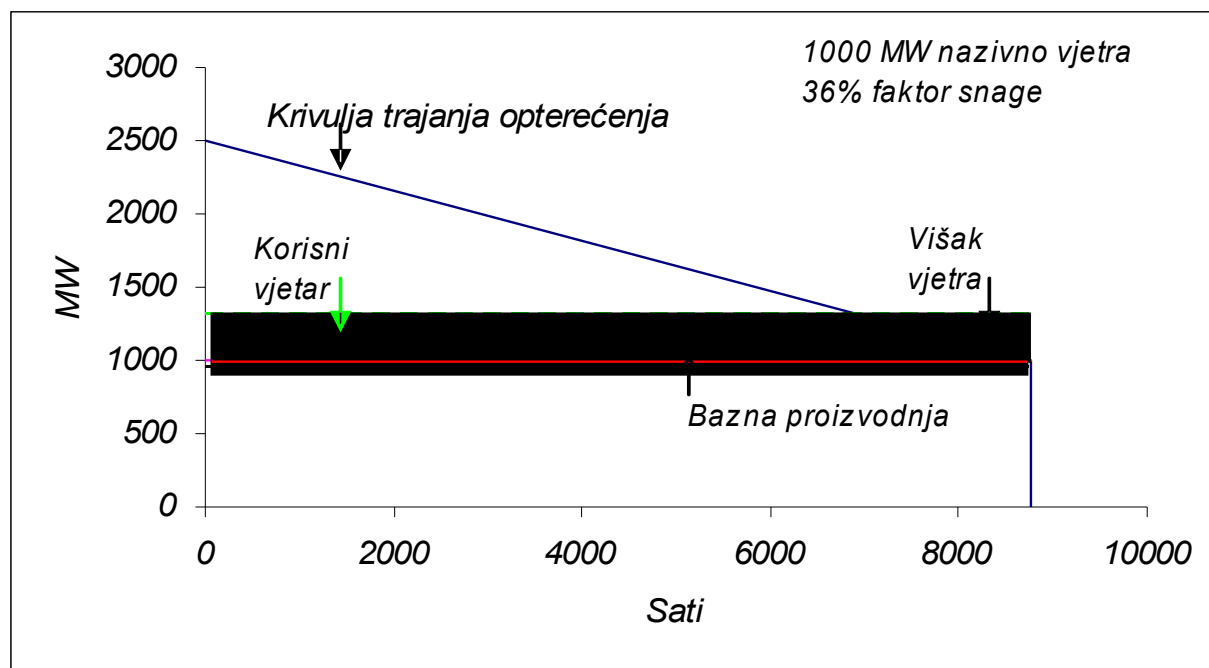
## Vjetroelektrana i EES

- Vjetra u blizini prenosne mreže je značajno manje od vjetra koji je više od 30 km udaljen od mreže.
- Ograničenja u kapacitetu mogu zahtijevati **izgradnju dužih vodova** što povećava troškove.
- **Problem viška vjetra (pri radu na mreži):**

Odbacivanje energije vjetroelektrana za snagu koja prelazi opterećenje minus baznu proizvodnju.

Provodi se na razini regionalne interkonekcije.

Promjenjivo za svaki period.



## Vjetroelektrana i EES

- *Najčešća vrsta priključka VE je na distribucijsku mrežu. **Distribucijska mreža do sada je bila pasivne naravi**, te je gotovo uvijek zadržavala stabilnost uz stabilnu prijenosnu mrežu.*
- *Ulazak distribuirane proizvodnja (i iz VE) uzrokuje promjene tokova djelatne i jalove snage, te stvara značajne tehničke i ekonomske posljedice po mrežu (povećanje struja kratkog spoja – moguće potrebe za izmjenom prekidača i sl.), a mijenja se i pristup zaštiti i stabilnosti s posebnim naglaskom na analizu stabilnosti kuta i napona.*
- *Stabilnost frekvencije pojavljuje se kao problem u izoliranim sustavima, kao što su oni na udaljenim otocima.*

## Vjetroelektrana i EES

- **Velika varijabilnost i slaba predvidljivost brzine vjetra – ograničenja pri integraciji u mrežu.**
- *Velika varijabilnost može se smanjiti instaliranjem VE na širokom području. Slaba predvidljivost korištenjem poboljšanih metoda predviđanja vremena (vjetra).*
- *Moguća i bolja regulacija uporabom VE s kontrolom nagiba lopatica i varijabilnom brzinom, ipak...*
- **VE mogu smanjiti potrošnju goriva u TE, ali ne mogu u potpunosti smanjiti njihovu izgradnju jer ne mogu jamčiti proizvodnju električne energije u kritičnim razdobljima (osim ukoliko nisu instalirani veći kapaciteti na širem području).**
- *Ako postoji povećana integriranost vjetroelektrana u EES, u slučaju brzih promjena vjetra i vrlo visokih brzina vjetra, može doći do iznenadnih gubitaka proizvodnje, odnosno do odstupanja frekvencije i dinamički nestabilnih stanja.*
- *Moguća uporaba kao **vršnog izvora** energije.*

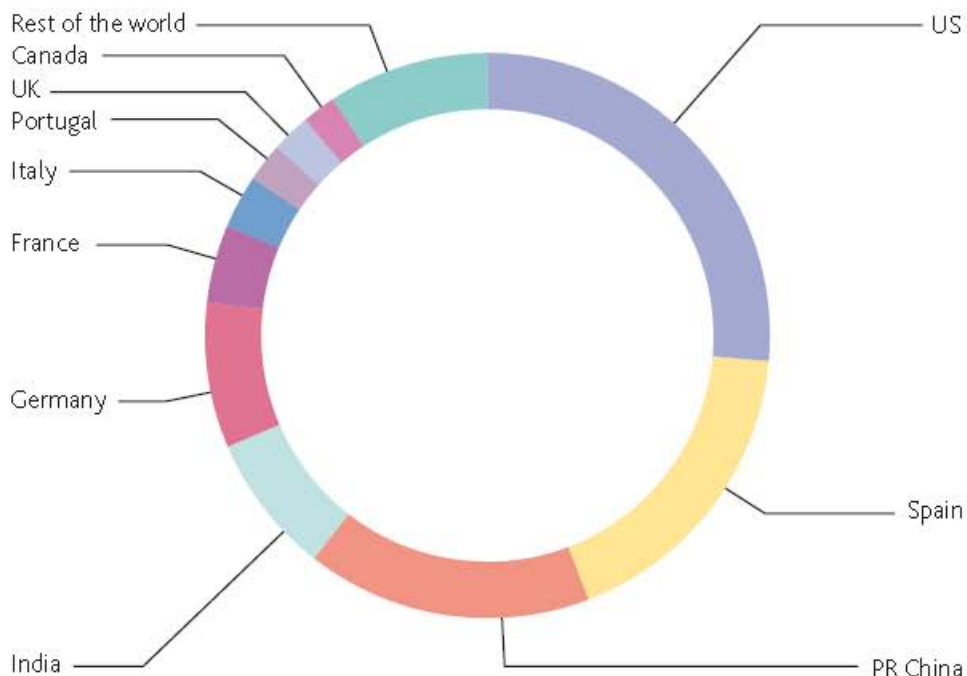


## Tržište energije vjetra u svijetu i EU

- Vrlo visok porast ukupno instalirane snage vjetroelektrana, koji je ukupno u svijetu na kraju 2008. iznosio preko **110 GW**.
- Treba naglasiti i da je **Europska unija** najveće je i najdinamičnije tržište energije vjetra s udjelom od oko 2/3 ukupne svjetske instalirane snage, te s prosječnim godišnjim porastom od 1997. od oko 35%, od čega:
  1. **Njemačka** s preko 22 GW (daleko najveći dio instaliranih VE u EU),
  2. **Španjolska** s oko 15 GW, te
  3. **Danska** s preko 3 GW (u kojoj udio proizvedene el. en. iz VE prelazi 20%).
- Na kraju 2007. godine u svijetu instalirano 94 GW VE koje su proizvele **190 TWh** električne energije (oko 10 x više od hrvatskih potreba). Samo **u 2007. godini instalirano 20 GW novih VE**.



## Novoinstalirana snaga u VE 2007. godine

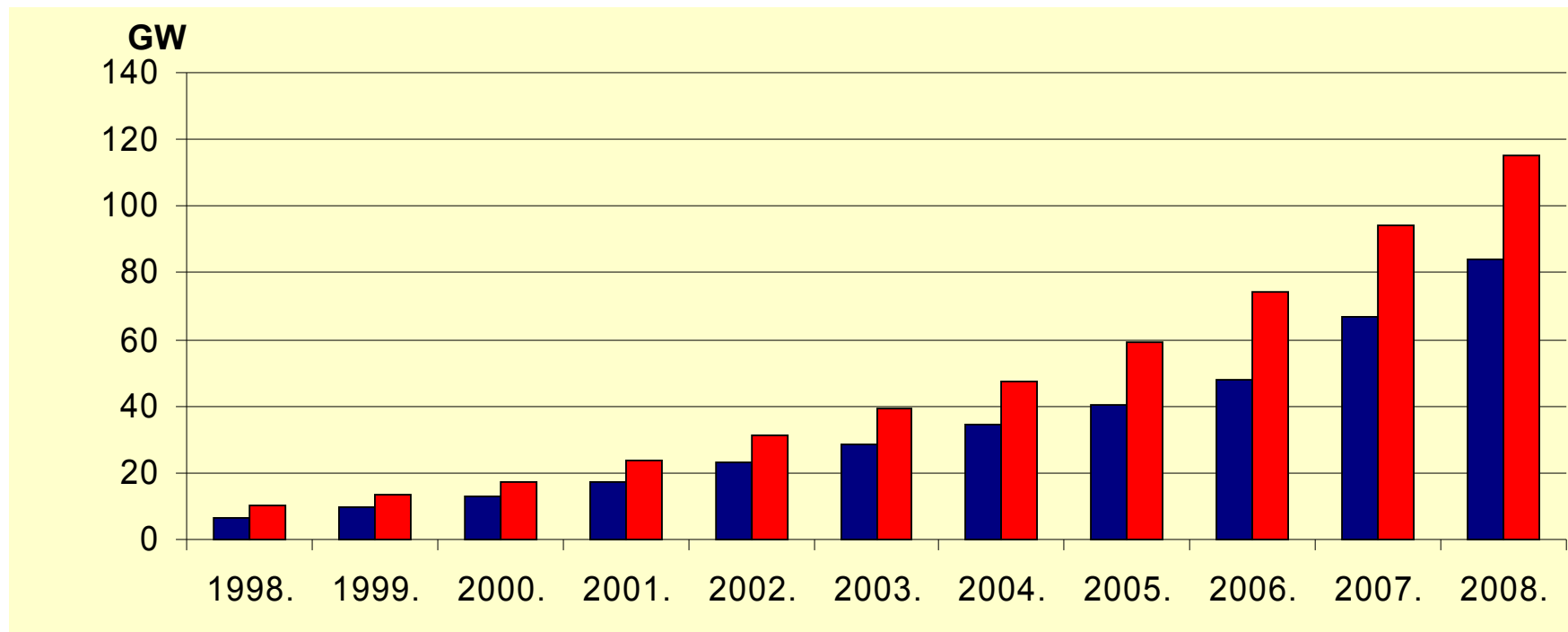


New capacity	MW	%
US	5,244	26.4
Spain	3,522	17.7
PR China	3,304	16.6
India	1,575	7.9
Germany	1,667	8.4
France	888	4.5
Italy	603	3.0
Portugal	434	2.2
UK	427	2.1
Canada	386	1.9
Rest of the world	1,815	9.1
<b>Top 10 – Total</b>	<b>18,050</b>	<b>90.9</b>
<b>World total</b>	<b>19,864</b>	<b>100.0</b>

- **2008.: SAD su pretekle Njemačku i postale svjetski broj 1, Kina udvostručila svoje instalirane kapacitete četvrtu godinu zaredom. U svijetu instalirano preko 27 GW (porast od 36 % u odnosu na 2007.). U EU 43% svih novih instaliranih kapaciteta iz OIE u vjetroelektranama.**

# Energija vjetra

## Tržište energije vjetra u svijetu i EU od 1998. – 2008.



Izvor: EWEA, GWEC

Prosječna  
godišnja stopa  
rasta

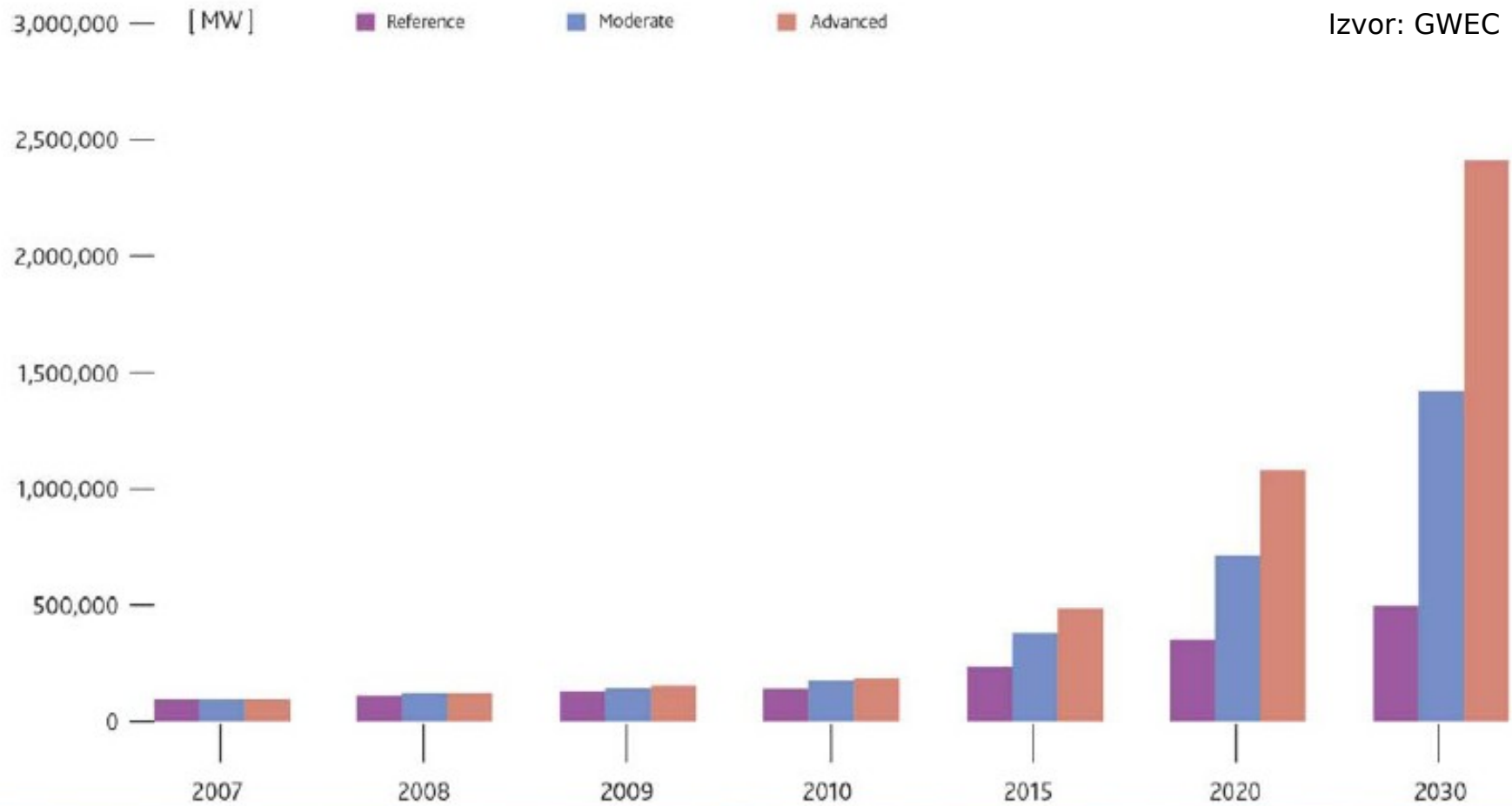
■ Europa  
1996.-2001.  
37,6%  
2001.-2006.  
22,6%

■ Svijet  
1996.-2001.  
31,4%  
2001.-2006.  
25,4%



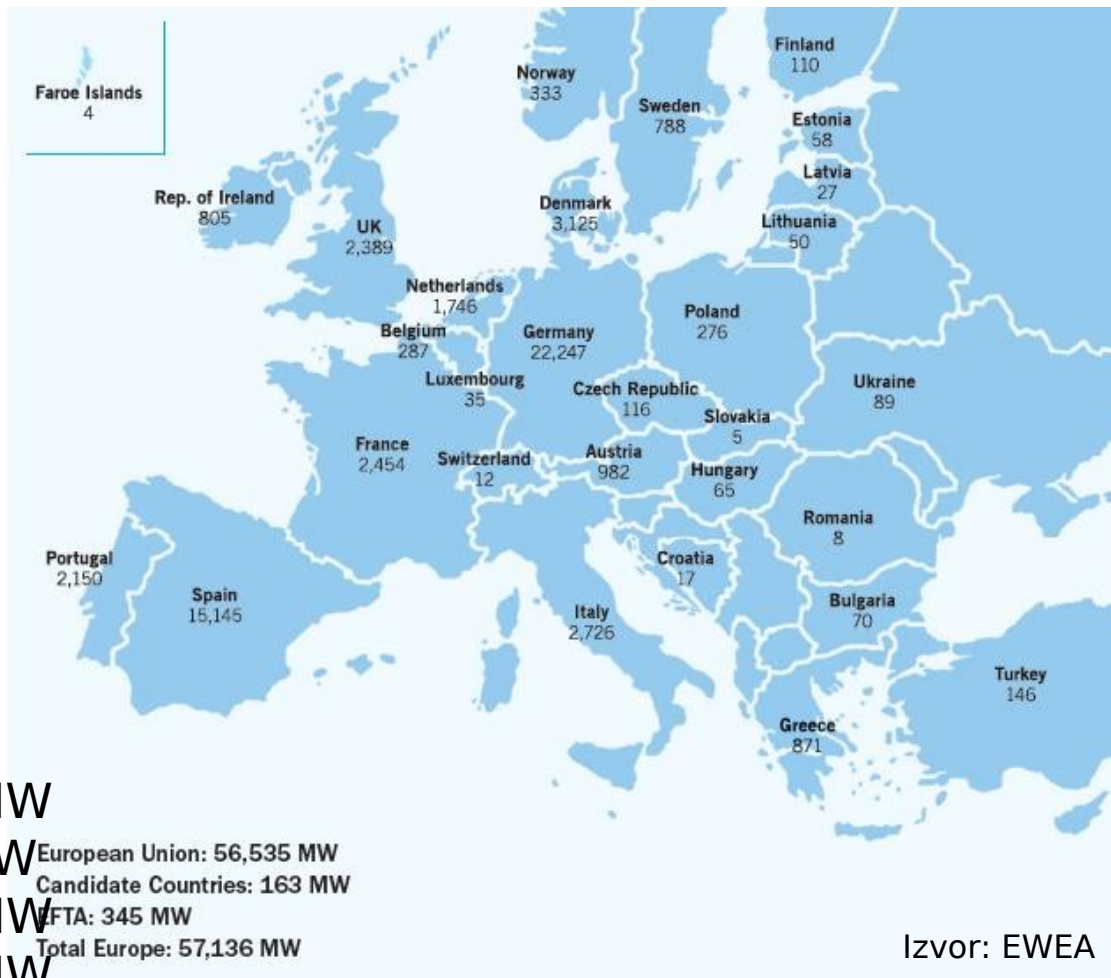
# Energija vjetra

## *Prognoza porasta instaliranih kapaciteta u svijetu od 2007 – 2030.*



# Energija vjetra

## Instalirana snaga VE u Europi krajem 2007.



Europska unija: 56.535 MW

Zemlje kandidati: 163 MW

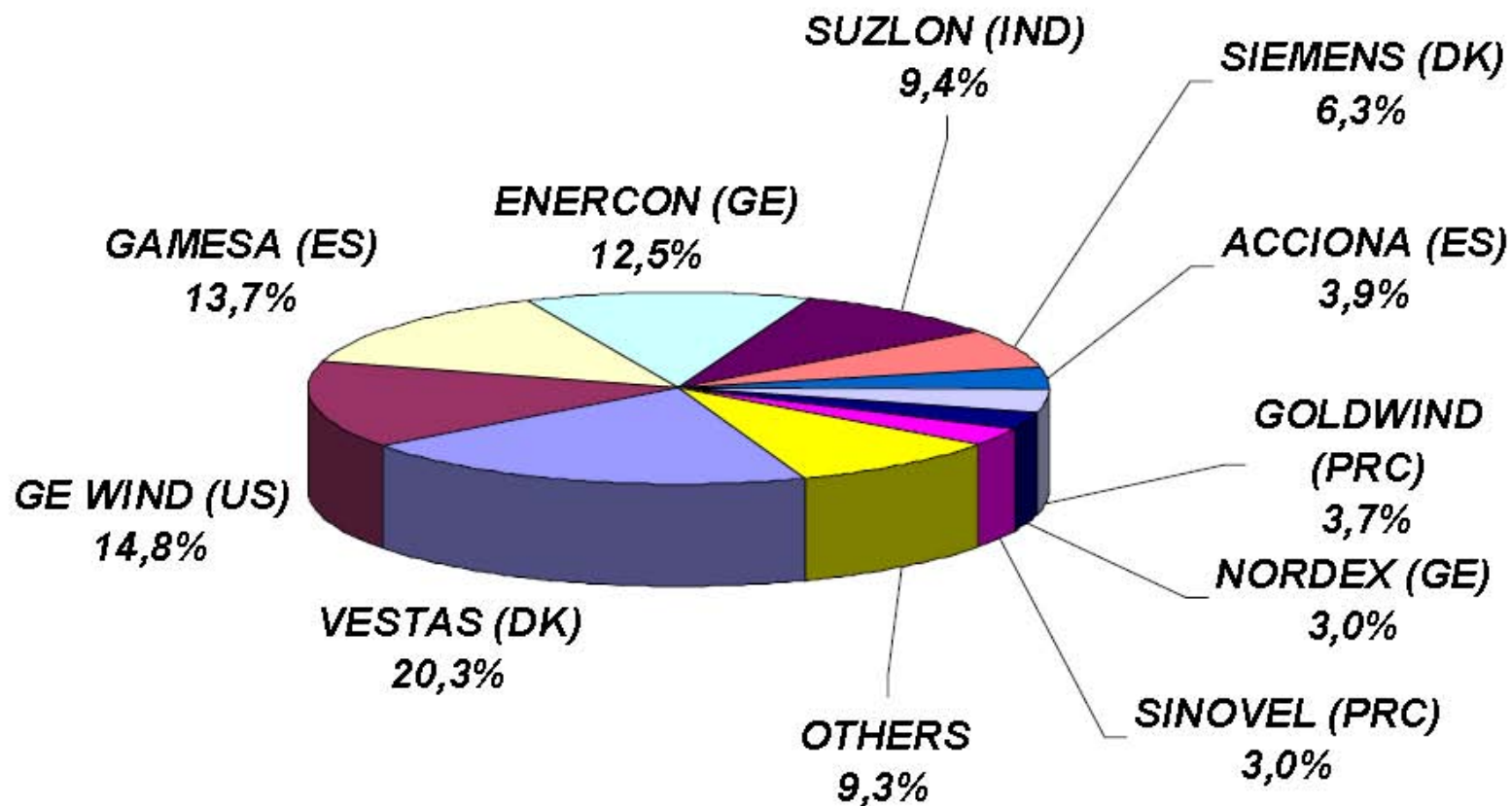
EFTA: 345 MW

Ukupno Europa: 57.136 MW



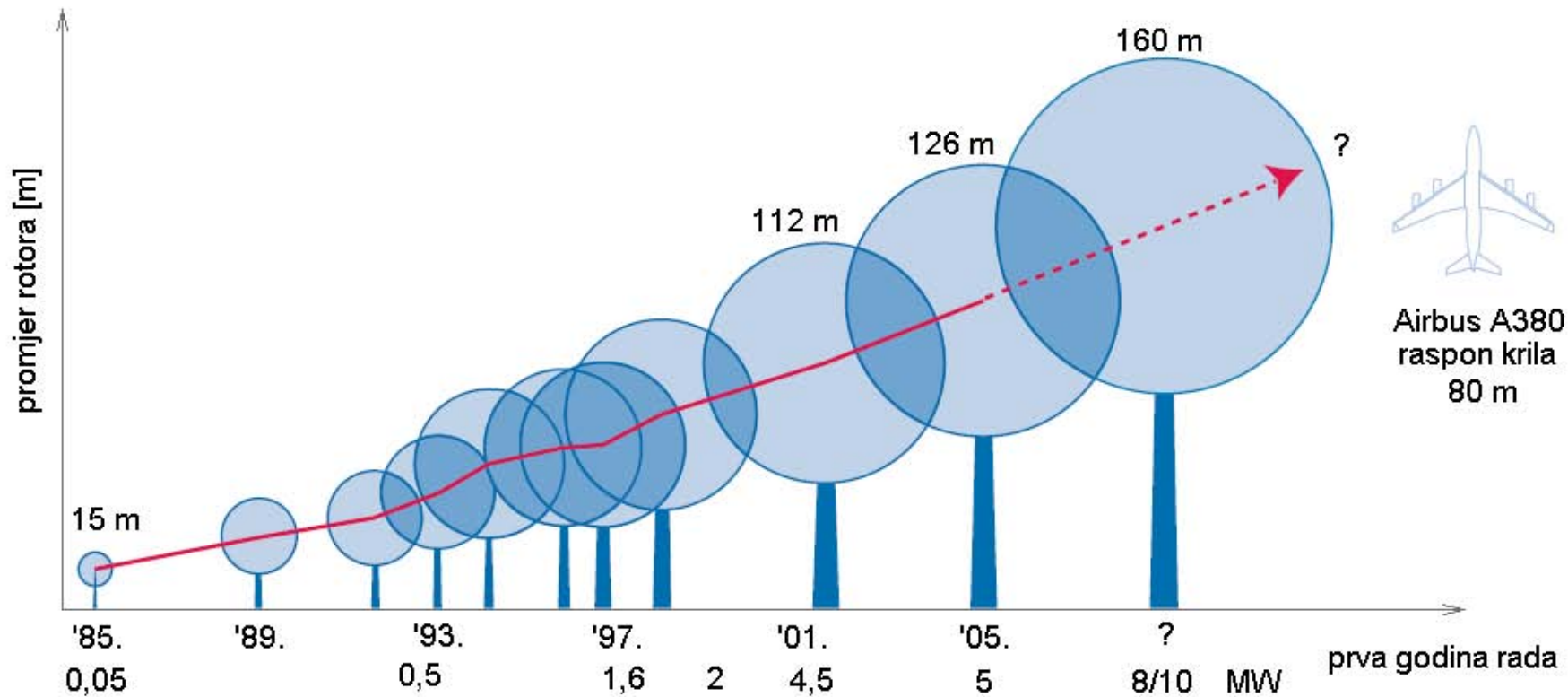
# Energija vjetra

**Proizvođači vjetroagregata u 2007. godini**  
**(% od ukupno 20,073 MW novoinstaliranih VE)**



# Energija vjetra

## Porast veličine vjetroagregata od 1985-2006



## Tržište energije vjetra u Hrvatskoj

- U Hrvatskoj je početno izdvojeno 29 lokacija koje su pogodne za izgradnju vjetroelektrana: **19 je na otocima i poluotoku Pelješcu, a 10 u priobalju.**
- Ukupna potencijalna godišnja proizvodnja el. energije putem VE samo na ovim lokacijama procjenjuje se u rasponu **od 0,375 do 0,80 TWh godišnje.**
- Osim tih lokacija potencijal na morskoj površini procijenjen je u rasponu od 350 do 500 GWh na godinu (problemi su dubinama i turizmom).
- Sve odabrane lokacije na jadranskom priobalju i otocima imaju **srednju godišnju brzinu vjetra veću od minimalnih 5,5 m/s** (lokacije koje imaju srednju godišnju brzinu vjetra manju od 5,5 m/s temeljem suvremenih svjetskih iskustava nisu prikladne i gospodarski opravdane za korištenje vjetra).



# Energija vjetra

## Vjetropark Ravne, otok Pag

- Na Ravnama iznad Paga *od kraja 2004. godine* izgrađen je sustav od sedam VE, duljina odabrane lokacije je približno 2 km.
- Na visini od 20 m iznad tla izmjerena je srednja godišnja brzina vjetra od **6,4 m/s**.
- Temeljem prikupljenih podataka, donja granica očekivane godišnje proizvodnje el. energije iznosi oko **12,36 GWh**.
- Jaki i česti udari bure izmjereni na ovoj lokaciji, često zabilježeni i veći od 40 m/s, dijelom su uvjetovali i izbor tipa vjetroturbine: **njemačka tvrtka Nordex**.
- Instalirano je **7 x 850 kW** vjetroturbina, čija je **ukupna snaga 5,95 MW**.
- Promjer rotora: 50 metara, površina rotora 1964 m<sup>2</sup>, a visina stupova 50 metara.
- Vrh krila u duljini 3,7 metara je moguće zakrenuti do 85° u odnosu na glavno krilo i služi kao aerodinamička kočnica.

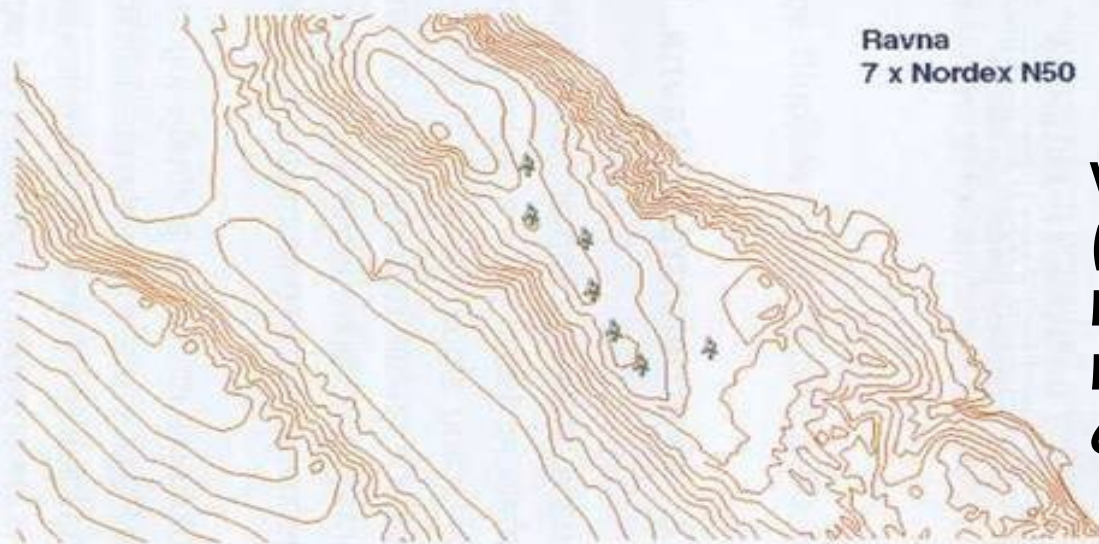


## Vjetropark Ravne, otok Pag

- Generator smješten u trup turbine je **dvonamotni 4/6 polni vodom hlađen kavezni asinkroni motor**. Za vrijeme slabijeg vjetra radi kao 6-polni 200 kW, a kod većih brzina vjetra kao 4-polni 800 kW generator. Priklučen je na distribucijsku mrežu preko tiristorske jedinice
- Ukupna investicija iznosi približno **48 milijuna kuna**, od toga 2,3 milijuna kuna otpada na troškove priključka te na konstrukciju i prilagodbu mjesta priključka.
- Planirana otkupna cijena proizvedene energije je 90 % prosječne prodajne cijene el. energije, odnosno donja granica otkupa je 0,0485 eura/kWh. Prema proračunima, **očekivana godišnja proizvodnja električne energije je između 13,5 i 15 GWh**.
- Vrijeme trajanja ugovora je 15 godina. Osnovni elementi i uvjeti privređivanja vjetroelektrane definirani su Ugovorom o kupoprodaji električne energije, potpisanim u jesen 2001. te revidiranim u proljeće 2004. godine između Hrvatske elektroprivrede i tvrtke **Adria Wind Power**.



Slika 6.5. Položaj vjetroelektrane Ravna u širem područja Paga.



**Vjetroelektrana  
(vjetropark)  
Ravne na otoku  
Pagu – inst.  
6 MW**

Slika 6.6. Raspored turbina vjetroelektrane Ravna.

## Vjetroelektrana Trtar-Krtolin, kod Šibenika

- Na brdima Trtar i Krtolin u zaleđu Šibenika *od lipnja 2006.* pušteno je u pogon **14 vjetroturbina** snage **1 MW** koje će proizvoditi **32 GWh** električne energije, što će zadovoljiti potrebe 10.000 domaćinstava.
- Osnivači i vlasnici su *njemačke tvrtke WPD International GmbH i Enersys Gesellschaft für regenerative Energien GmbH*, a otkup električne energije osiguran je ugovorom s Hrvatskom elektroprivredom.
- Prema njihovim podacima faktor opterećenja je preko 30 % i žao im je što nisu instalirali snažnije jedinice.
- Vjetroelektrana je sklopila ugovor o sponzorstvu s Gradom Šibenikom i 0,5 posto godišnjeg prihoda od proizvodnje električne energije izdvajat će kao potporu projektima u Šibeniku.
- Financiranje gradnje Vjetroelektrane Trtar-Krtolin strukturirano je prema modelu projektnog financiranja, jer se projekt kreditira novčanim tokom koji sam generira.
- Rok otplate kredita je 14 godina, a s HEP-om je sklopljen ugovor o kupoprodaji el. energije na rok od 15 godina.



## **Energija vjetra u HR – ostali projekti i planovi**

- *Osim ovih vjetroelektrana, u planu su i novi projekti, odnosno izgradnja još:*
  1. *Dvije VE na Pagu, Novalja 1 i 2, nazivne snage 17,00 MW,*
  2. *Jedna VE u Dubrovačkom primorju, Rudina, naz. snage 52,5 MW,*
  3. *Dvije vjetroelektrane na Visu*
  4. *Jedne kod Obrovca*
  5. *Tovarnik – kod Iloka*
- *Procjenjuje se da u Hrvatskoj ima stotnjak lokacija za vjetroelektrane ukupne snage oko 600 MW.*
- *Na obroncima Čićarije rovinjska Valalta i njemački Wallenbron Projektentwicklung planiraju gradnju 34 vjetroturbogeneratora snage 80 MW, vrijednu 80 milijuna eura.*
- *U planu je i gradnja vjetroelektrana kod Senja i Gračaca.*
- *U različitim fazama pripreme, od mjerenja vjetropotencijala do u cijelosti pripremljenih projekata, danas je više od 50 vjetroelektrana u Hrvatskoj!*



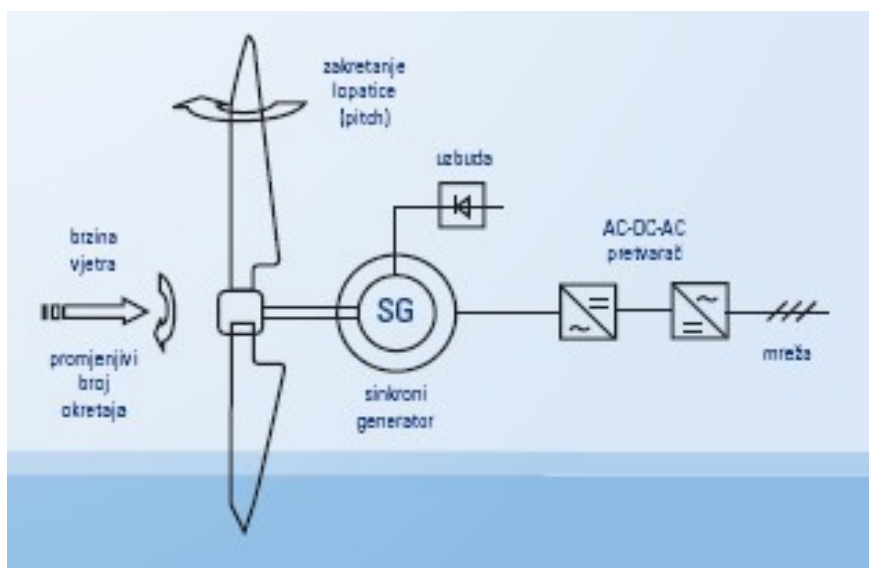
## *Energija vjetra u HR – ostali projekti i planovi*

- *Procjenjuje se da bi elektroenergetska mreža **odmah mogla prihvatiti oko 300-400 MW, a nakon prilagodbe još toliko**, dakle čak 35 puta više u odnosu na postojeće kapacitete.*
- *Interes investitora je toliki da 20 puta premašuje trenutne mogućnosti prihvata mreže. Već sada ima oko **1500 MW najavljenih projekata vjetroelektrana, u relativno visokoj fazi pripreme, a interesa ima i za oko 3500 MW.***
- *Ovih godina očekuje se dramatična ekspanzija, jer je cilj do 2010. poticati proizvodnju iz obnovljivih izvora do udjela od 5,8 posto u ukupnoj potrošnji električne energije, dok je sada taj udjel oko jedan posto, ne računajući proizvodnju velikih hidroelektrana.*



## Vjetroelektrana Končar KO-VA 57/1

Nominalna snaga	1000 kW
Visina glavčine	60 m
Regulacija snage	zakretanjem lopatica (pitch)
Brzina uključivanja	2,5 m/s
Naživna brzina	11 m/s
Brzina isključivanja	25-30 m/s
Brzina preživljavanja	59,5 m/s



### VJETROAGREGAT KO - VA 57 / 1



1. Osnovni nosač  
 2. Osnovni sustav za zakretanje glavčine  
 3. Osnovni sustav za zakretanje lopatica  
 4. Osnovni nosač  
 5. Osnovni nosač  
 6. Osnovni nosač  
 7. Osnovni sustav za zakretanje lopatica  
 8. Lopatica  
 9. Osnovni nosač  
 10. Osnovni nosač za glavčinu  
 11. Osnovni nosač za glavčinu  
 12. Osnovni nosač  
 13. Osnovni nosač  
 14. Osnovni nosač  
 15. Osnovni nosač

1. Osnovni nosač  
 2. Osnovni nosač za zakretanje glavčine  
 3. Osnovni nosač za zakretanje lopatica  
 4. Osnovni nosač  
 5. Osnovni nosač  
 6. Osnovni nosač  
 7. Osnovni sustav za zakretanje lopatica  
 8. Lopatica  
 9. Osnovni nosač  
 10. Osnovni nosač za glavčinu  
 11. Osnovni nosač za glavčinu  
 12. Osnovni nosač  
 13. Osnovni nosač  
 14. Osnovni nosač  
 15. Osnovni nosač

**KONČAR**  
 Končar - Inženjerska i proizvodna kompanija d.o.o.