

Tuulegeneraatorite rajamise ja kasutamisega kaasnevad probleemid

Rein Oidram, TTÜ elektroenergeetika instituut
11. november 2008. a.



Tuulegeneraator, õigemini elektrituulik, on seade tuule kineetilise energia muundamiseks elektrienergiaks



Tuulepark Gotlandil



Elektrituulik Rõuges
Tuuliku nimivõimsus on 3 kW



Elektrituulikud Virtsus
Tuulikute nimivõimsus on à 600 kW



Tuulest ammutatava võimsuse teoreetiline maksimum avaldub nn Betz'i seadusega:

$$P_{Betz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_{PBetz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot 0,59, W$$

kus ρ - õhu tihedus, kg/m³

A - rootori labade jälje pindala, m²

v - tuule kiirus, m/s

C_{PBetz} - võimsuskasutusteguri Betz'i väärtus

Võrrand ei arvesta vältimatuid pööriskadusid. Labaotste suure kiirussuhtega ($\lambda > 3$) ja optimaalse laba geomeetriaga turbiinidel on pööriskaod väga madalad. Väikese λ väärtustel ($\lambda \approx 1$) on maksimaalne võimsuskasutustegur C_{Pmax} ligikaudu 0,42.

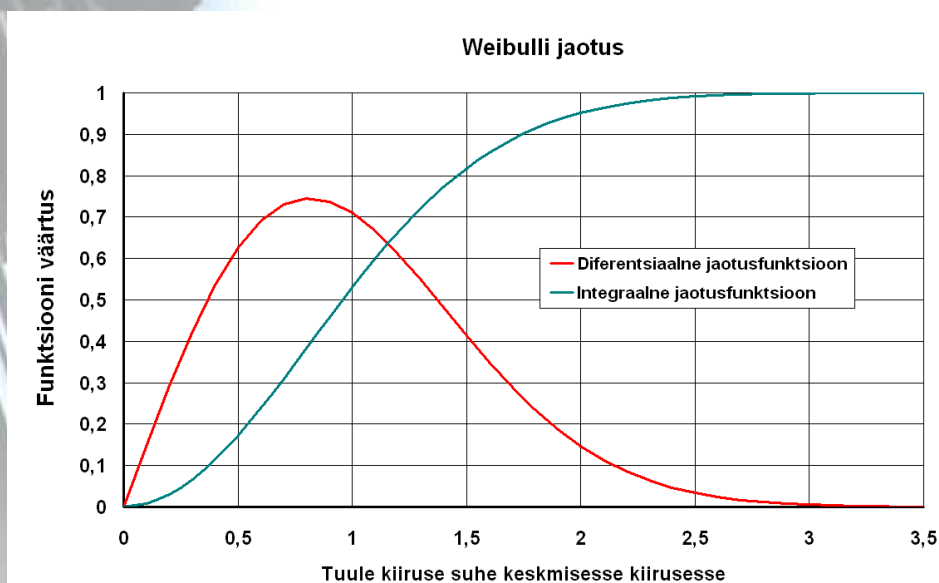
Labootste kiirussuhe λ on defineeritud seosega

$$\lambda = \frac{v_{tip}}{v_{tuul}}$$

kus v_{tip} - labaotsa kiirus, m/s

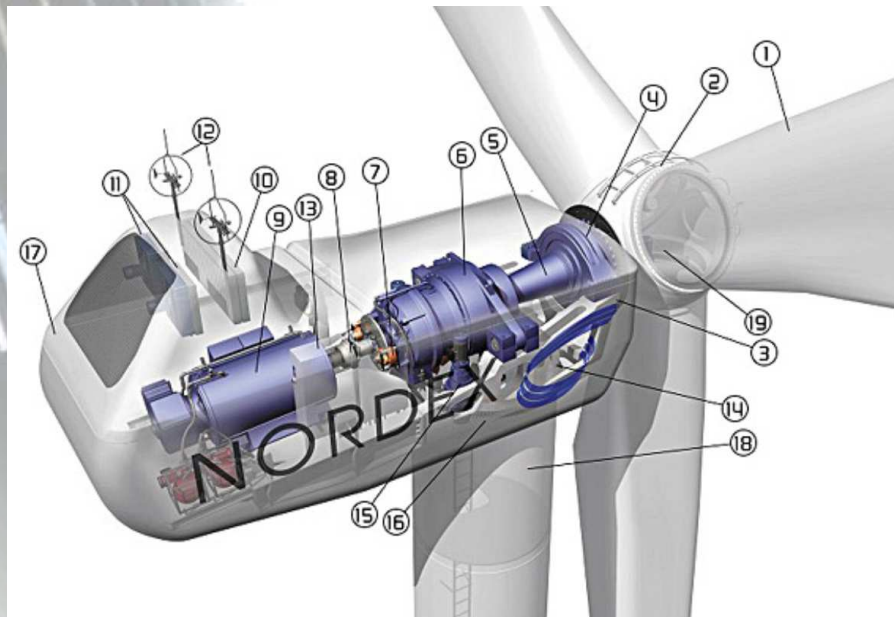
v_{tuul} - tiivikut läbiva tuule kiirus, m/s

- Tuule võimsus kasvab võrdeliselt kiiruse kuubiga. Kiirusel 25 m/s on tuule võimsus ligikaudu 15 korda suurem, kui kiirusel 10 m/s.
- Tuul ei ole teadagi püsiv, selle kiiruse muutused alluvad statistilistele seaduspärasustele. Kõige paremini iseloomustab tuule kiiruste jaotust Weibulli jaotusfunktsioon.

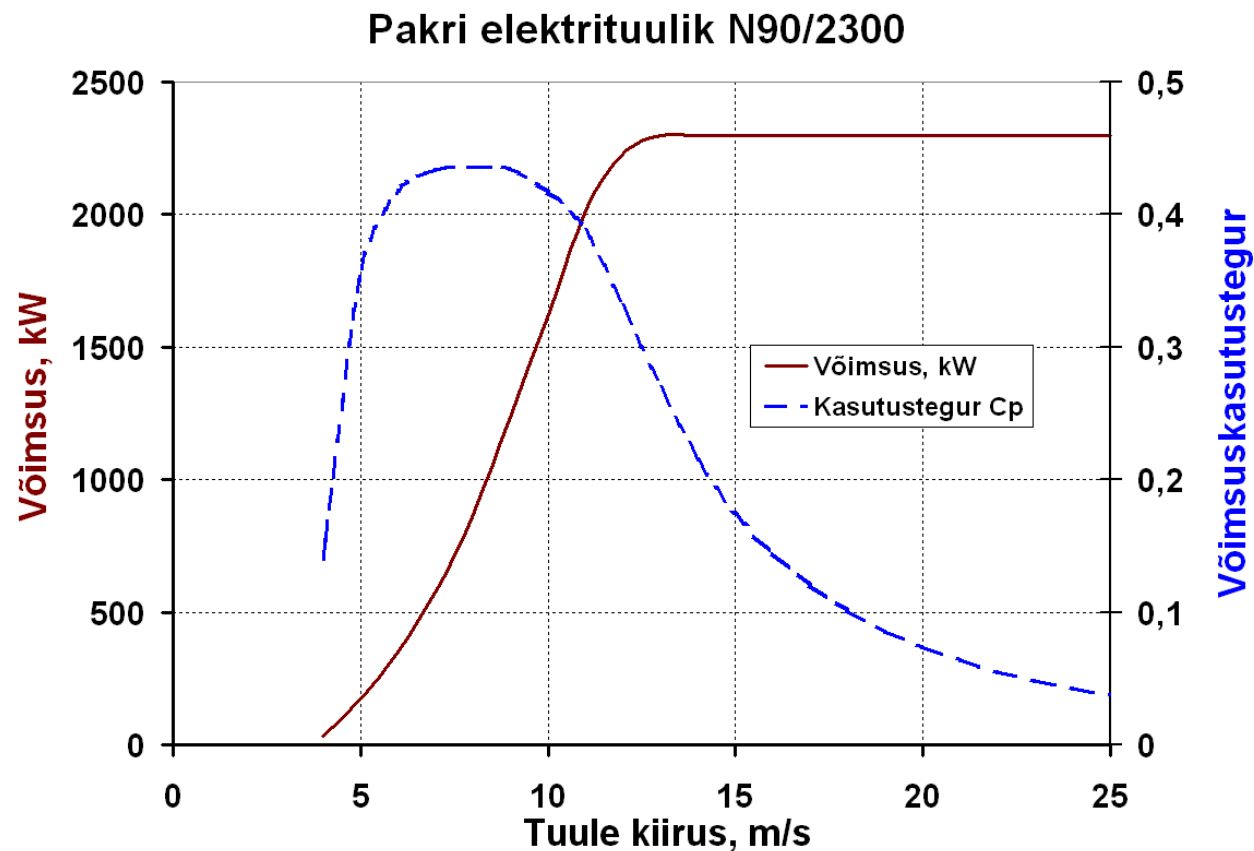
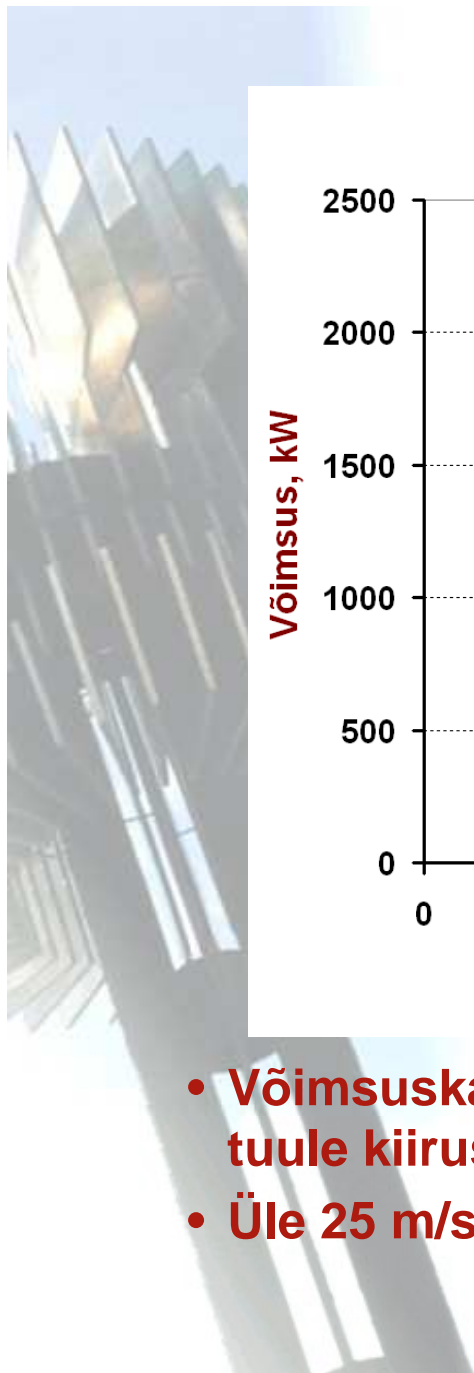


- Kui püüda kogu seda võimsust ära kasutada, tuleks ehitada väga võimsad tiivikud, tornid ja elektrigeneraatorid. Samal ajal isegi väga heades tuulepiirkondades jääb tuule keskmine kiirus alla 10 m/s.

- **Elektrituulik, mis ehitatud sobivaks suurtele tuule kiirustele, ei suudaks käivituda väiksetel tuule kiirustel ja enamik tuules sisalduvast energiast jääks kasutamata.**
- **Kaasaegsed elektrituulikud on ehitatud nii, et nende võimsust tuule suurtel kiirustel piiratakse labade (1) kaldenurga reguleerimisega (19) või õhuvoolu rebenemisega tiival.**
- **Tuuliku võimsuse reguleerimine võimaldab ühtlustada nende**



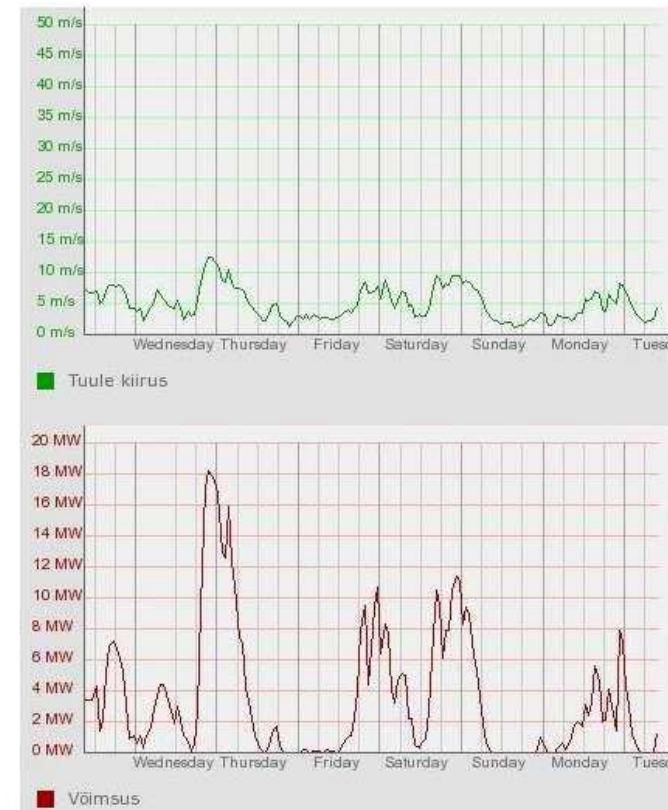
poolt arendatava võimsuse kõikumisi, mis on väga vajalik koostöös teiste elektrijaamadega elektrisüsteemis. Kahjuks vähendab see meetod elektrituulikute energeetilist efektiivsust tuule suurtel kiirustel.



- Võimsuskasutusteguri C_p suurimad väärtused saavutatakse tuule kiirusvahemikus 5 kuni 10 m/s.
- Üle 25 m/s pannakse tuulik seisma, sest ta võib puruneda.

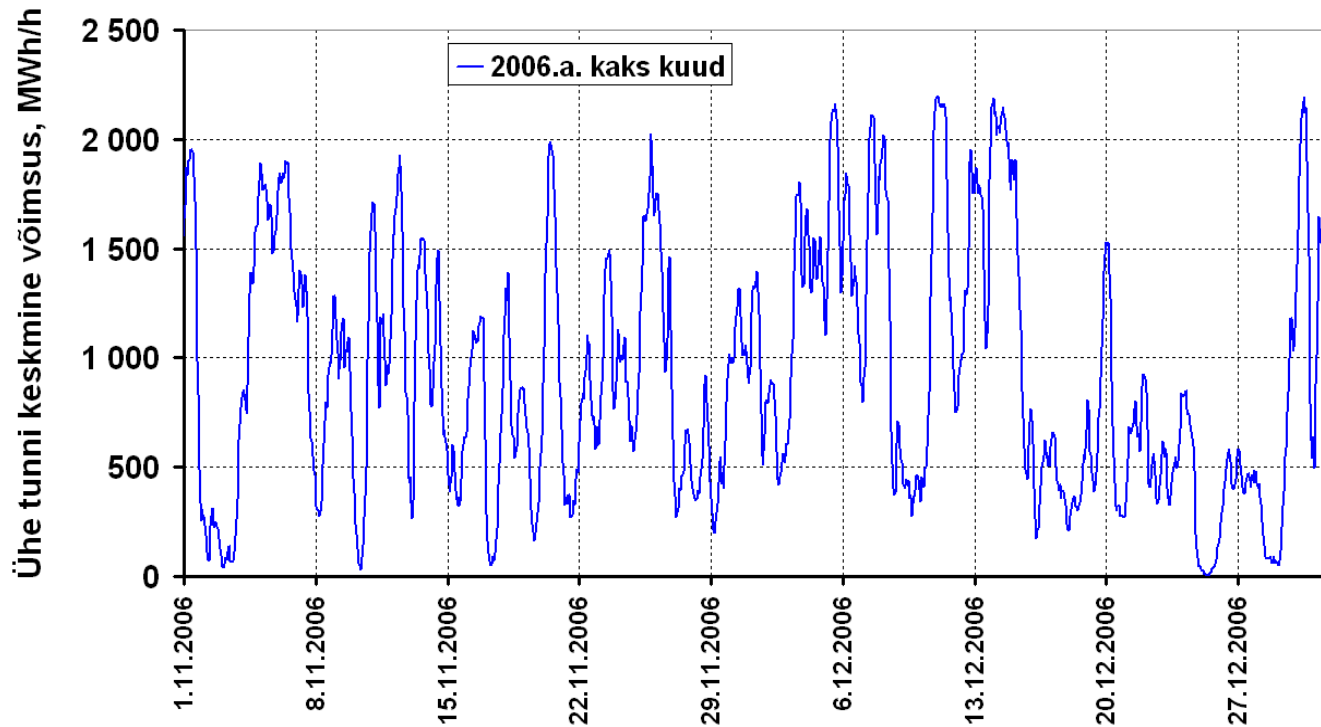


Viimane nädal* 23.02.2006 - 28.02.2006



- Nii üksiku seadme kui ka tuulepargi võimsus kõigub suures ulatuses nullist kuni nimivõimsuseni. Vahet tuleb teha hetkvõimsusel ja keskmisel tunni, päeva, kuu, jne võimsusel.
- Ülal on toodud näited Pakri tuulepargi võimsuse muutuste kohta ööpäeva ja nädala jooksul.

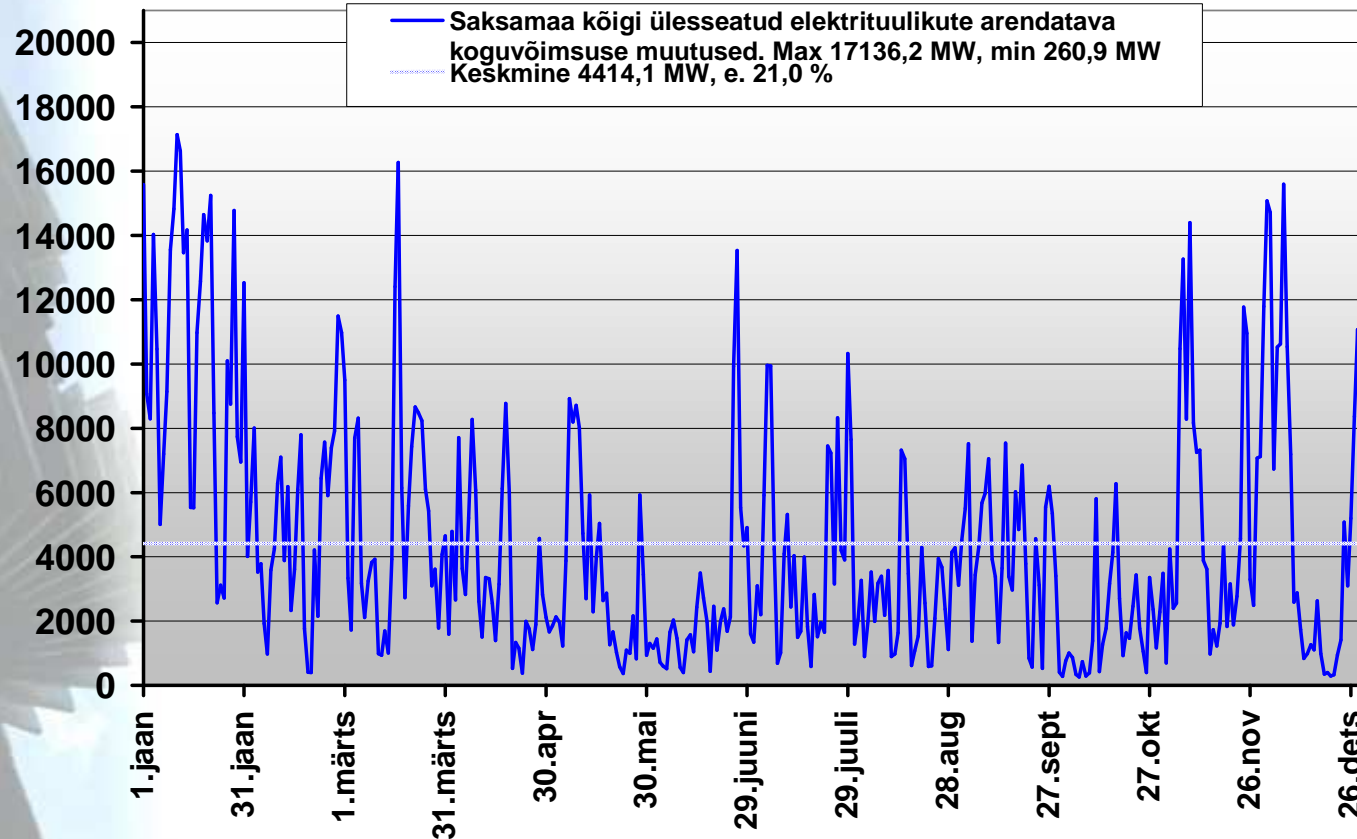
Lääne-Taani elektrituulikute koguvõimsus 2380 MW



- **Elektrituulikute hajutamine üle suure maa-ala ühtlustab võimsuse muutuseid ajas, kuid siiski ei kaota täielikult.**
- **Joonisel on esitatud Taani lääneosa elektrituulikute poolt arendatud võimsuse muutused ajas kahe kuu jooksul. Võimsuse miinimumväärtus võib olla isegi null, suurim on aga umbes 90% tuulikute summaarsest ülesseatud võimsusest.**

Saksamaa kõigi elektrituulikute ülesseatud võimsus oli 2007.a. kokku ca
21000 MW

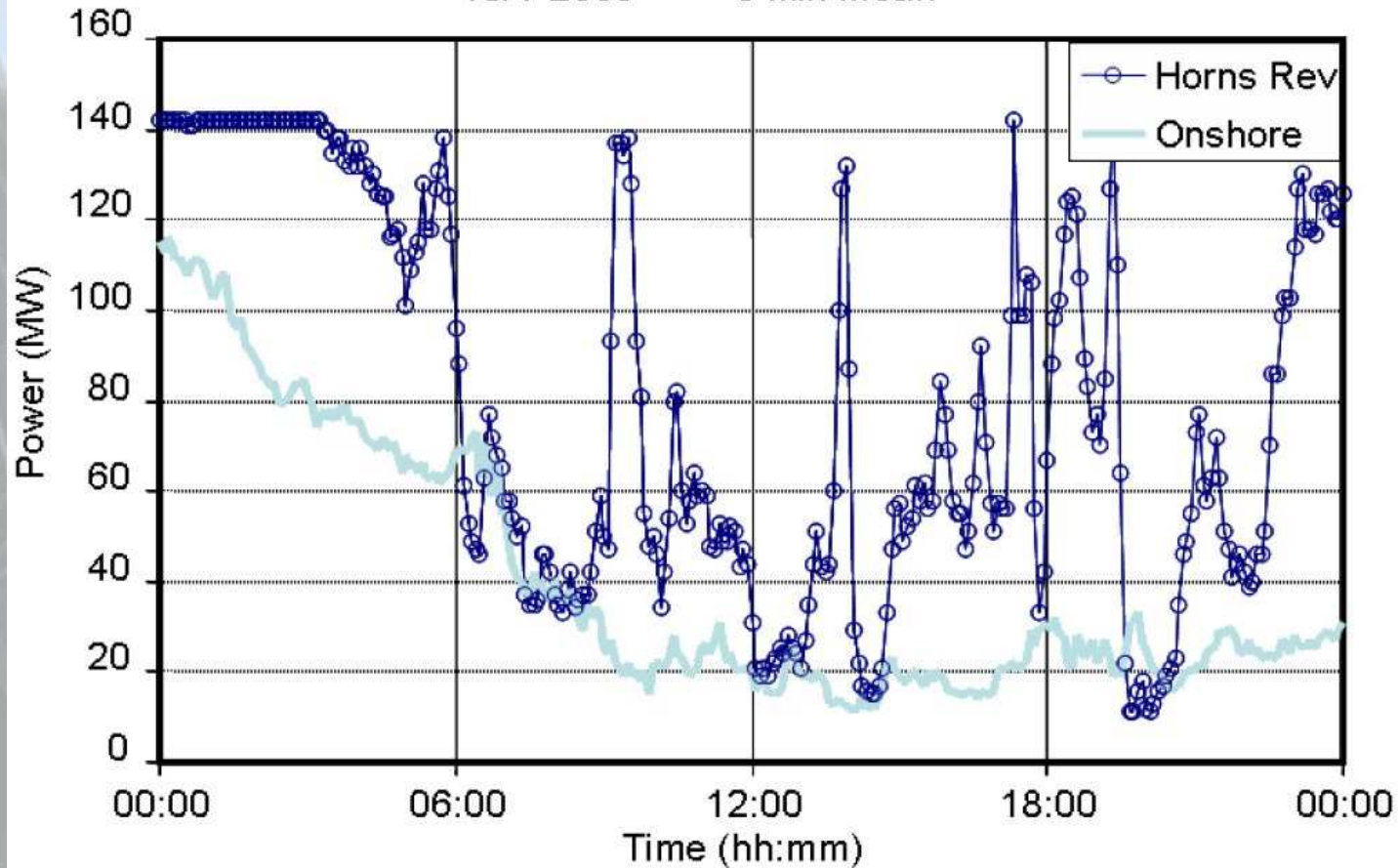
Ööpäeva keskmine arendatud võimsus, MW



Väga suurele maa-alale paigutatud suure hulga tuulikute võimsusmiinimum jääb ikkagi nulli lähedale, suurim võimsus aga ületab 80% üleseatud võimsusest üliharva.

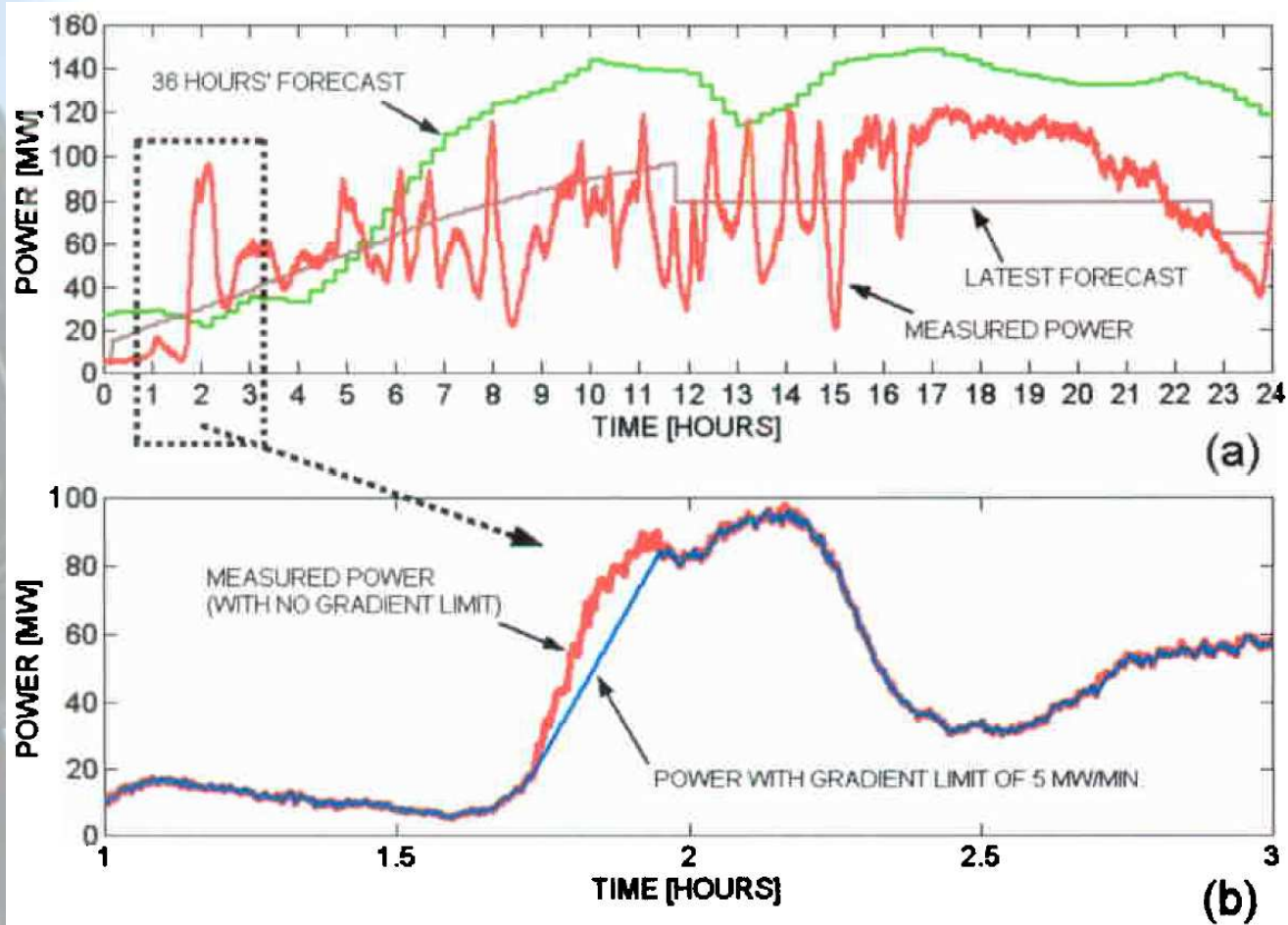
Horns Rev A – ülesseatud võimsus 160 MW

18/1-2005 - 5 min mean



Iseäranis kiired ja suure amplituudiga on avamere tuuleparkide võimsuse kõikumised.

Horns Rev A – ülesseatud võimsus 160 MW



Võimsuse suure kõikumisega kaasneb prognoosi suurem ebatäpsus. Kohati ületatakse elektrisüsteemi reguleerimisvõime.

- **Elektrisüsteemi toimimise eripäraks on, et igal ajahetkel peab elektrijaamade arendatav võimsus võrduma elektritarbimise võimsusega. Kõrvalekaldumine sellest reeglist tähendab võrgu sageduse muutumist, mis tekitab tööstusele suuri lisakulutusi ja elektrikellade valenäitusid.**
- **Elektrituulikute võimsuse stohhastilise iseloomuga kõikumisi peab tasakaalustama süsteemis toimivate teiste elektrijaamade võimsuse vastassuunas muutmisega.**
- **Elektrijaamad jagatakse tavaliselt kondensatsioonitüüpi elektrijaamadeks, mis väljastavad ainult elektrienergiat, koostootmisjaamadeks (väljastavad elektrienergiat ja soojust), hüdroelektrijaamadeks ja tuuleelektrijaamadeks (elektrituulikuteks).**
- **Eelistatud on koostootmisjaamad (*ingl. lüh. CHP*) ja hüdroelektrijaamad (HEJ), kuna esimesed võivad kütust põletada suure kasuteguriga (osa sellest kuulub elektri, osa sooja tootmisele) ning teised kütust ei kuluta.**

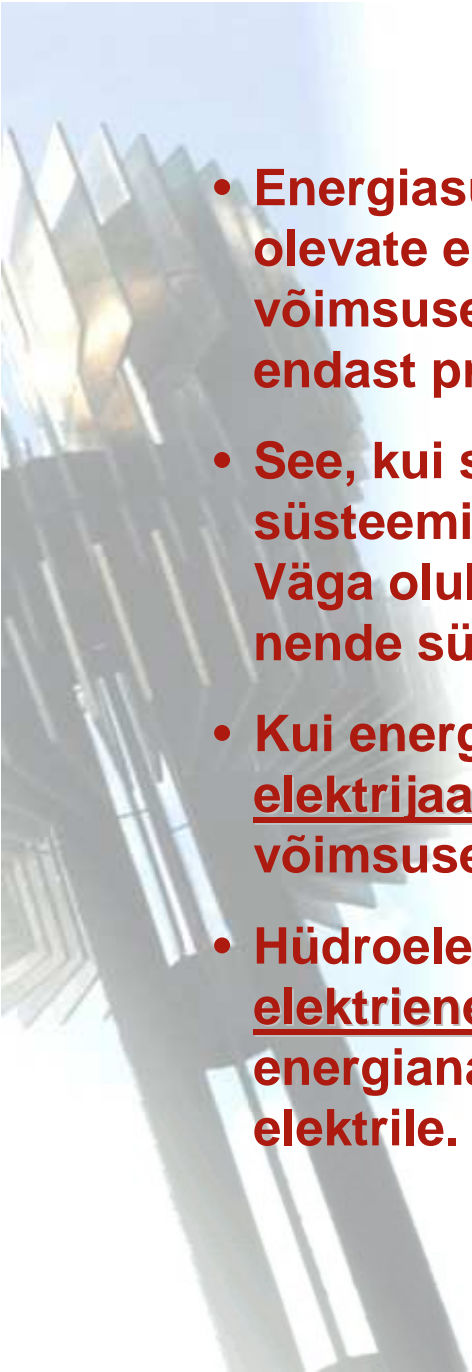
- **Energiasüsteem vajab veel elektrijaamu, mida süsteemi dispetšeril on võimalik reguleerida vastavalt koormuse või tuuleelektrijaamade võimsuse muutustele ja tekkida võivatele eriolukordadele.**
- **Selleks kahjuks koostootmisjaamad ei sobi, kuna kõrge kasuteguri saavutamiseks peavad need järgima soojus-, aga mitte elektrikoormust. Seega on süsteemis veel vältimatult vajalikud kas hüdroelektrijaamad või kondensatsioonielektrijaamad.**
- **Eestis veeressurss praktiliselt puudub. Siit siis ka paratamatu vajadus kasutada madalama kasuteguriga kondensatsioonielektrijaamu. Sellised on Narva elektrijaamad, kuid kasutada võib ka kivisöejaamu ja gaaskütusel töötavaid jaamu, mida meil praegu veel ei ole.**
- **Mõeldav on akumulatsiooni-elektrijaamade kasutamine.**

- Üks kõige halvemaid vigu, mida Eesti inforuumis energia-
küsimuste käsitlemisel tehakse on, et kas ei osata eristada või
lausa sihilikult aetakse segi võimsus ja energia – räägitakse
energiast, aga mõõdetakse seda kilovattides (megavattides) või
vastupidi. Kui juhitakse tähelepanu veale, siis kehitatakse õlgu
ja öeldakse, et mis seal vahet!
- Teeme siiski neil kahel füüsikalisel suurusel ranget vahet!
Energia mõõdame kilovatt-tundides (kWh), gigavatt-tundides
(GWh) jne, ning võimsust kilovattides (kW), megavattides (MW)
või ka gigavattides (GW).
- Elektrisüsteemi veatuks toimimiseks peab olema tagatud
võimsuste bilanss. Bilansi rikkumine halvendab elektri
kvaliteeti, suurendab kütusekulu ja halvimal juhul võib esile
kutsuda süsteemi suuravarii.
- Elektrijaamades toodetud elektrienergia hulga määrab aga see,
kui kaua elektrijaam mingit konkreetse suurusega võimsust
arendab.

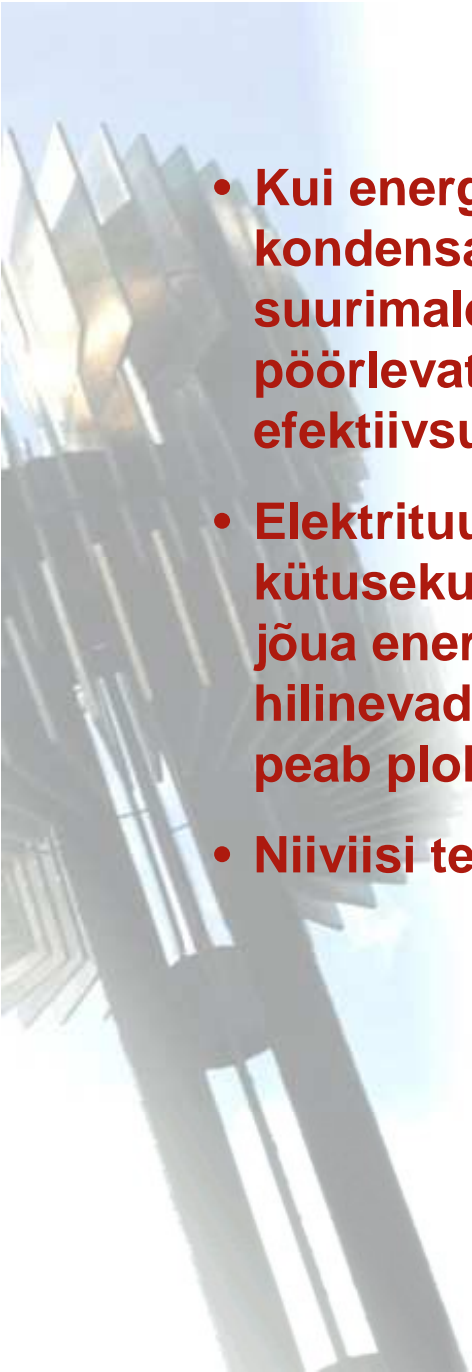


Elektrituulikute koostöö süsteemi muude elektrijaamadega

Põhiküsimus – kas elektrituulikute abil on võimalik ja kui on, siis kui palju saab teistes elektrijaamades vähendada kütuste põletamist ja kasvuhoonegaaside heiteid?

- 
- **Energiasüsteemi elektri jaamade koostoimimisel süsteemis olevate elektrituulikutega on põhiprobleemiks tuulikute võimsuse sagedased ja kiired muutumised. Tuul kujutab endast praktiliselt juhitamatut energiaallikat.**
 - **See, kui suurel määral saab tuuleenergiat mingis energiasüsteemis kasutada, sõltub süsteemi struktuurist ja suuruselt. Väga olulised on seejuures sidemed naabersüsteemidega ja nende süsteemide struktuur ning suurus.**
 - **Kui energiasüsteemis toodetakse oluline osa elektrist hüdroelektri jaamades, saab tuule kiiruse kõikumistest tulenevaid võimsuse muutusi kompenseerida nende jaamade abil.**
 - **Hüdroelektri jaamade kasutamine tähendab sisuliselt elektrienergia salvestamist veehoidlatesse vee potentsiaalse energiana ja tekkiv kütusesääst on võrdeline tuulega toodetud elektrile.**

- Kui energiasüsteem koosneb ainult soojuselektrijaamadest, siis:
 - peavad elektrituulikute võimsuse kõikumisi asuma kompenseerima kondensatsioonielektrijaamad, kuna koostootmisjaamad järgivad tavaliselt soojuskoormust,
 - suuri kondensatsiooniplokke pole võimalik sagedasti lühikeseks ajaks käivitada ja seisata, piiratud on samuti võimsuse muutmise kiirused.
- Kui soovitakse üles seada palju elektrituulikuid, peavad soojuselektrijaamade võimsuse reguleerimisulatus ja –kiirus vastavalt suurenema.
- Soojuselektrijaamade elektritoodang on elektrituulikute puudumisel tasakaalus elektritarbimisega. Koormuse jaotus jaamade (plokkide) vahel optimeeritakse, s.o kütusekulu viiakse miinimumi. Kuna koormus muutub suhteliselt aeglaselt ja mitte väga suures ulatuses, kasutatakse nn staatilisi sisendväljundkarakteristikuid.

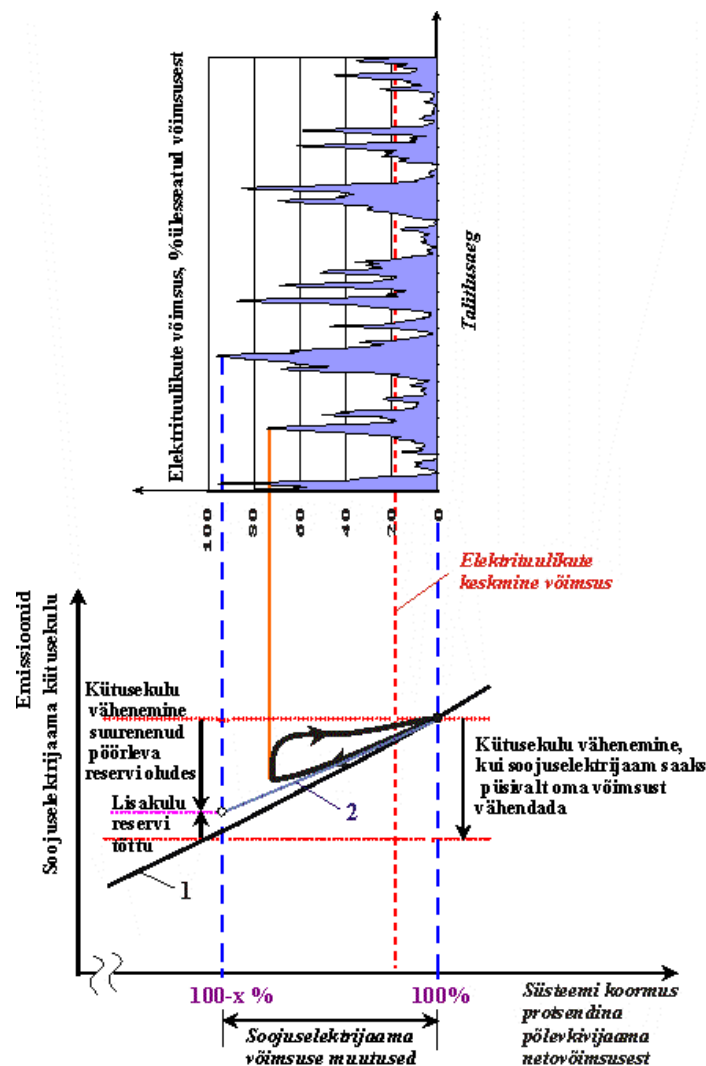
- 
- Kui energiasüsteemis on ka elektrituulikud, peavad kondensatsioonielektriyaamad hoidma elektrituulikut suurimale võimalikule arendatavale võimsusele võrdset pöörlevat reservi. Selle tagajärjel soojuselektriyaamade efektiivsus langeb ja suureneb kütusekulu ning emissioonid.
 - Elektrituulikut võimsuse kiirete muutustega kaasneb täiendav kütusekulu nn hüstereesi tõttu - tänu soojuslikule inertsile ei jõua energiaplokid täpselt järgida koormuse muutusi, vaid alati hilinevad. Hilinemise ulatus on seda suurem, mida kiiremini peab plokkide võimsus muutuma.
 - Niiviisi tekib kütuse dünaamiline kulukarakteristik.

Tuuleenergia tasakaalustamine ja kütusekulu suurenemine

Kütusekulu suurenemist põhjustava protsessi kirjeldamine on suhteliselt keeruline. Seepärast on kõrvaloleval joonisel protsessi kulgu näidatud ainult informatsiooniks.

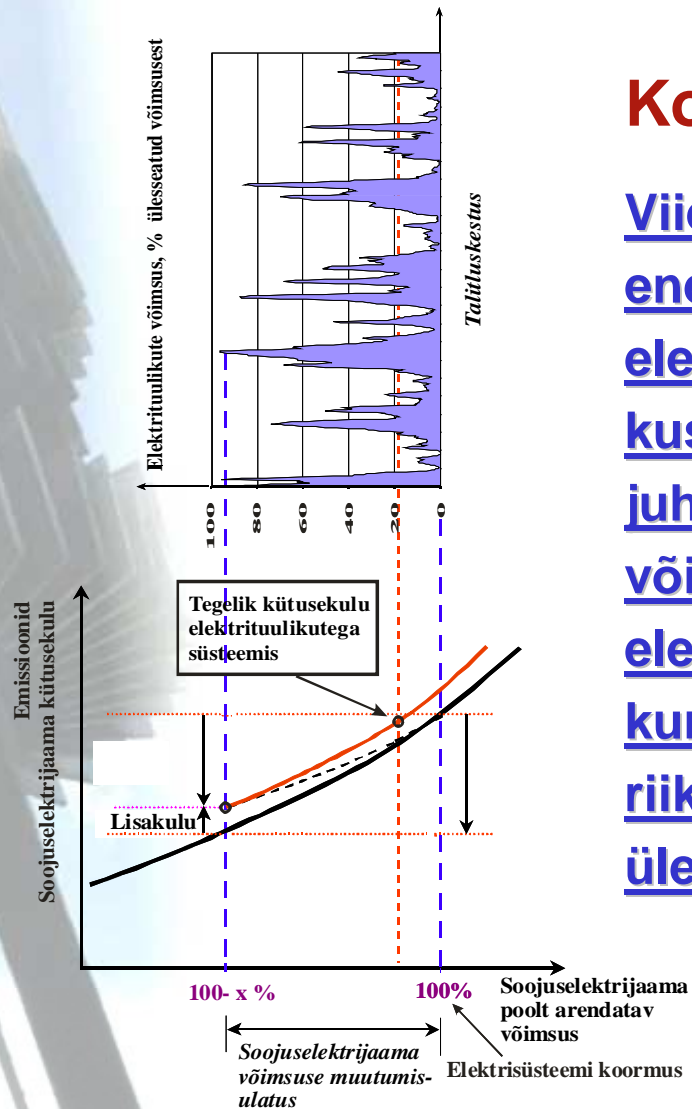
1 – algne soojuselektrijaama kütuse kulukarakteristik,

2 – sama karakteristik, arvestades lisanõudeid pöörlevale reservile elektrituulikute rakendamisel



Kokkuvõtvalt:

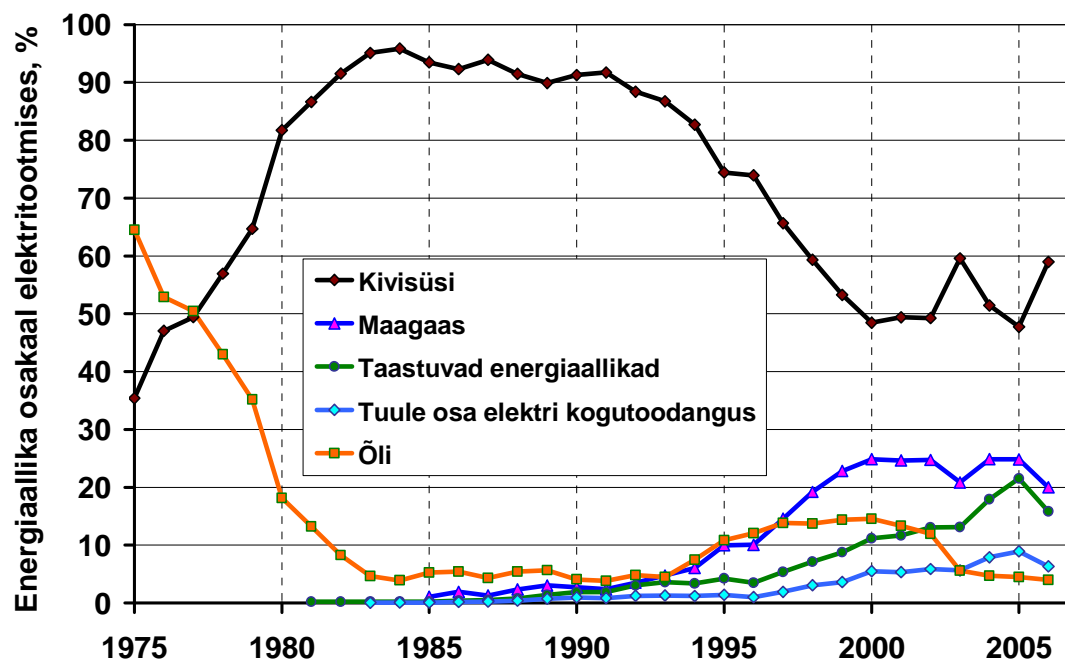
Viies Eesti soojuselektrijaamadega energiasüsteemi sisse suurema hulga elektrituulikuid saavutame olukorra, kus kütuse kokkuhoidu enam ei teki juhul, kui elektrituulikute ülesseatud võimsus ületab 200 MW piiri ja nende elektritoodang jääb vahemikku 370 kuni 400 GWh. Eesti peab paratamatult riiklikult kehtestama elektrituulikute ülesseadmise võimsuspiirangu.





Elektrituulikute kasutamistulemused Taanis

Eestile on kasulik teada, millised olid elektrituulikute massilise kasutusevõtu (ja elektrituru avamise) mõjud Taanis, kuna seal oli elektritootmise struktuur enne elektrituulikute massilist kasutusevõttu üsna sarnane meie oma struktuuriga.

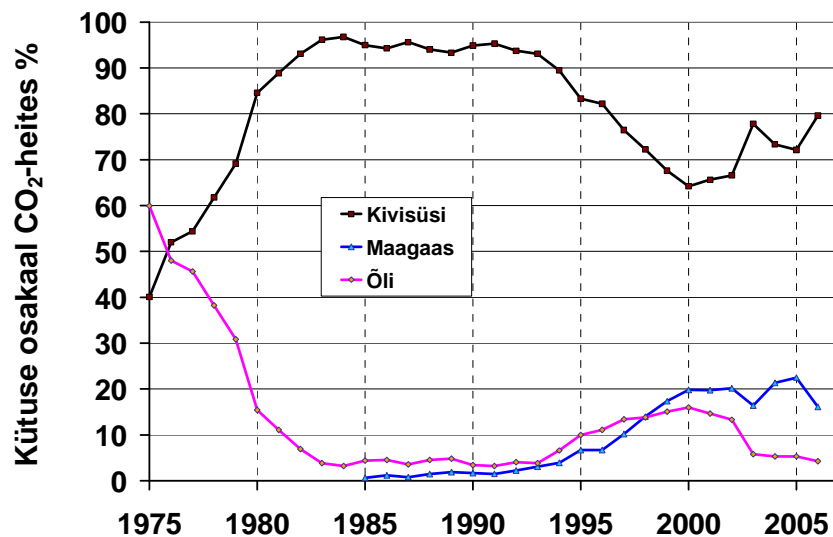


- Taani tuule-energeetika arendamise käivitas umbes 30 aastat tagasi naftakriis. Esialgu toimus elektritootmisel üleminek naftalt kivisöele.

Kütuste kasutamine elektri tootmiseks Taanis

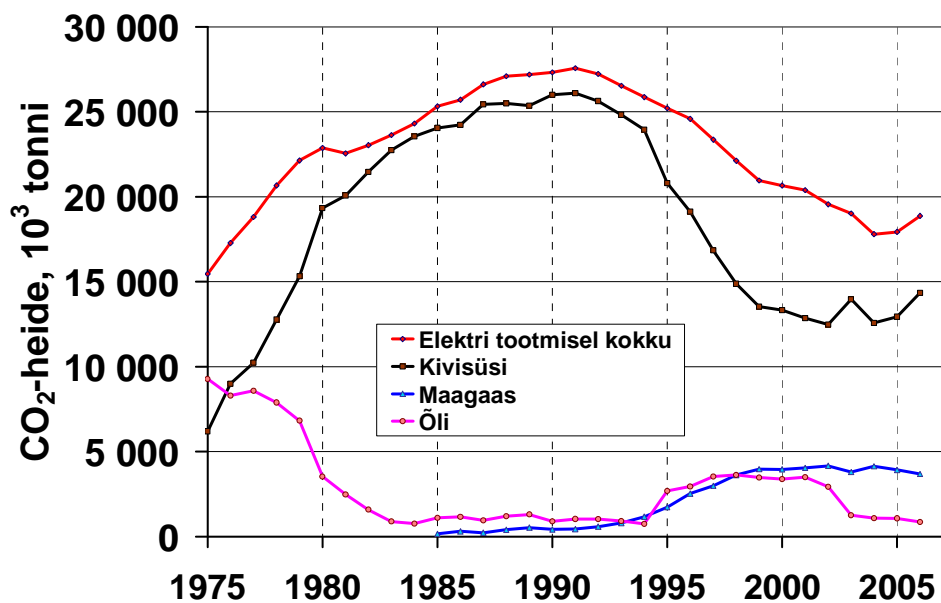
- 1990. aastatel muutus eriti tuntuks üleminek maagaasi kasutamisele. Umbes 1993. aastast alates on mõnevõrra taastunud ka õli kasutamine.
- Taastuvate energiaallikate kasutamine oli kuni 2000. aastani suhteliselt tagasihoidlik.

- Kivisöele üleminek põhjustas elektri ekspordile ja kliimamuutustele taandatud CO₂-heite umbes kahekordse suurenemise, sest kivisütt põletati väga suures mahus. 1980. a. põletati kivisütt 9,7 milj. tonni, 1996. a. rekordilised 15,1 milj. tonni ja 2006. a. 8,4 milj. tonni. Samuti on suur erinevus CO₂ heitetegurites (emissioonitegurites): õlidel umbes 74...78 kg/GJ, kivisöel 95 kg/GJ.
- Põhjamere maagaasi kasutuselevõtt leevendas olukorda oluliselt. Aastaks 2000 langes kivisöe osakaal elektri tootmises umbes 50 ja



gaasi osa kasvas 25 protsendini. Mingil määral suurenes uuesti ka õli kasutamine. Kuna maagaasi CO₂ heitetegur on keskmiselt 57 kg/GJ, siis saavutati üldine emissioonide tunduv vähenemine.

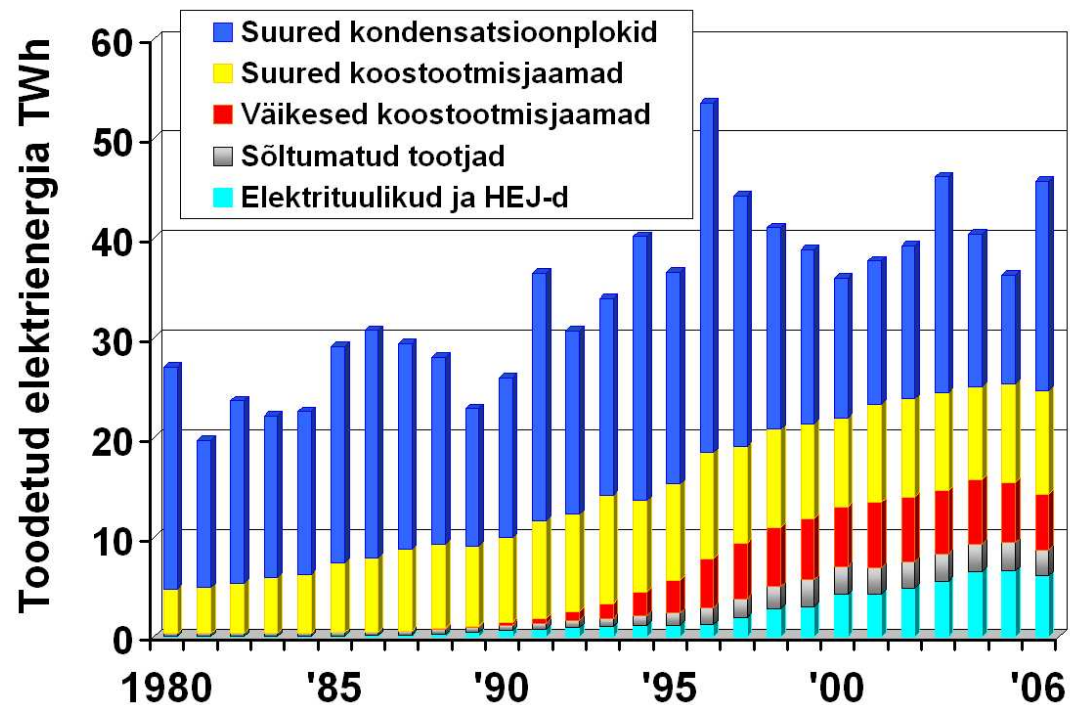
Erinevate kütuste osakaal CO₂-heites elektri tootmisel Taanis



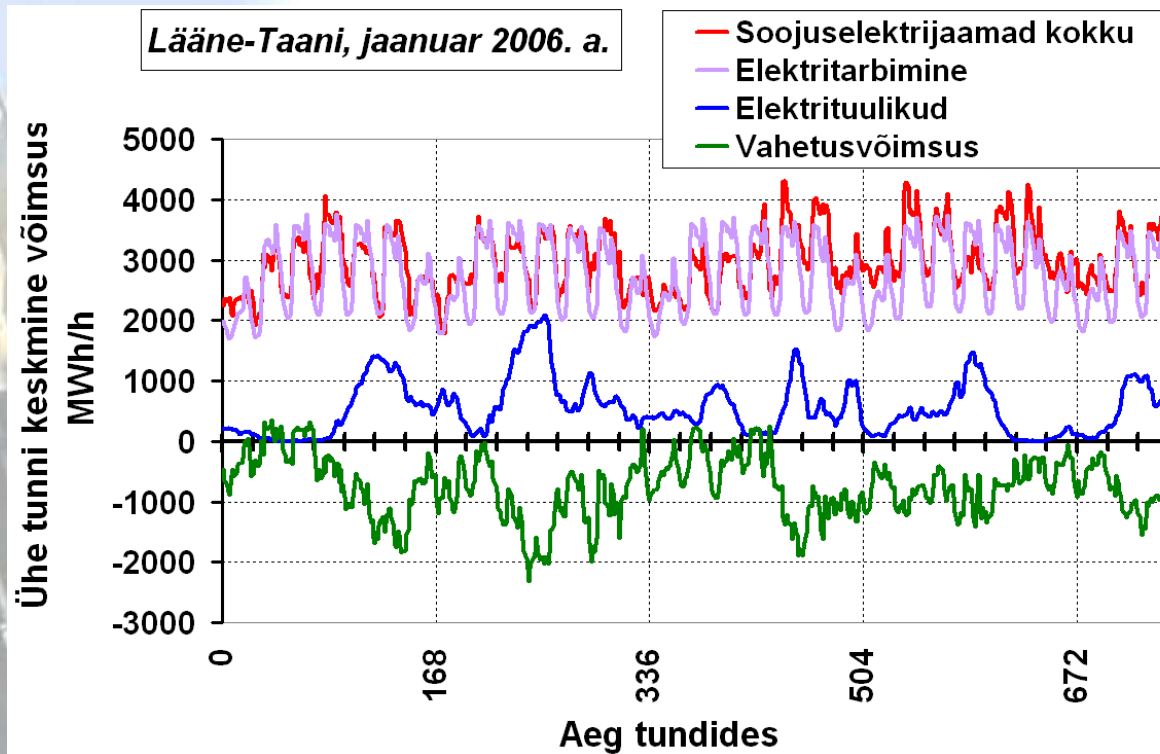
Elektri ekspordile ja kliimamuutustele taandatud CO₂-heide elektri tootmisel

- Joonistelt on näha elektritootmise arengu järsk muutus pärast 2000. aastat. Kivisöe põletamise vähenemine peatus ja asendus hoopis uue suurenemisega, õli põletamine vähenes uuesti ja kasvas taastuvate energiaallikate kasutamine.

- Tähelepanuväärne on kivisöe põletamisest tingitud süsihappegaasi heide uus suurenemine ja seda vaatamata taastuvenergia (sealhulgas tuuleenergia) kasutamise kasvule.



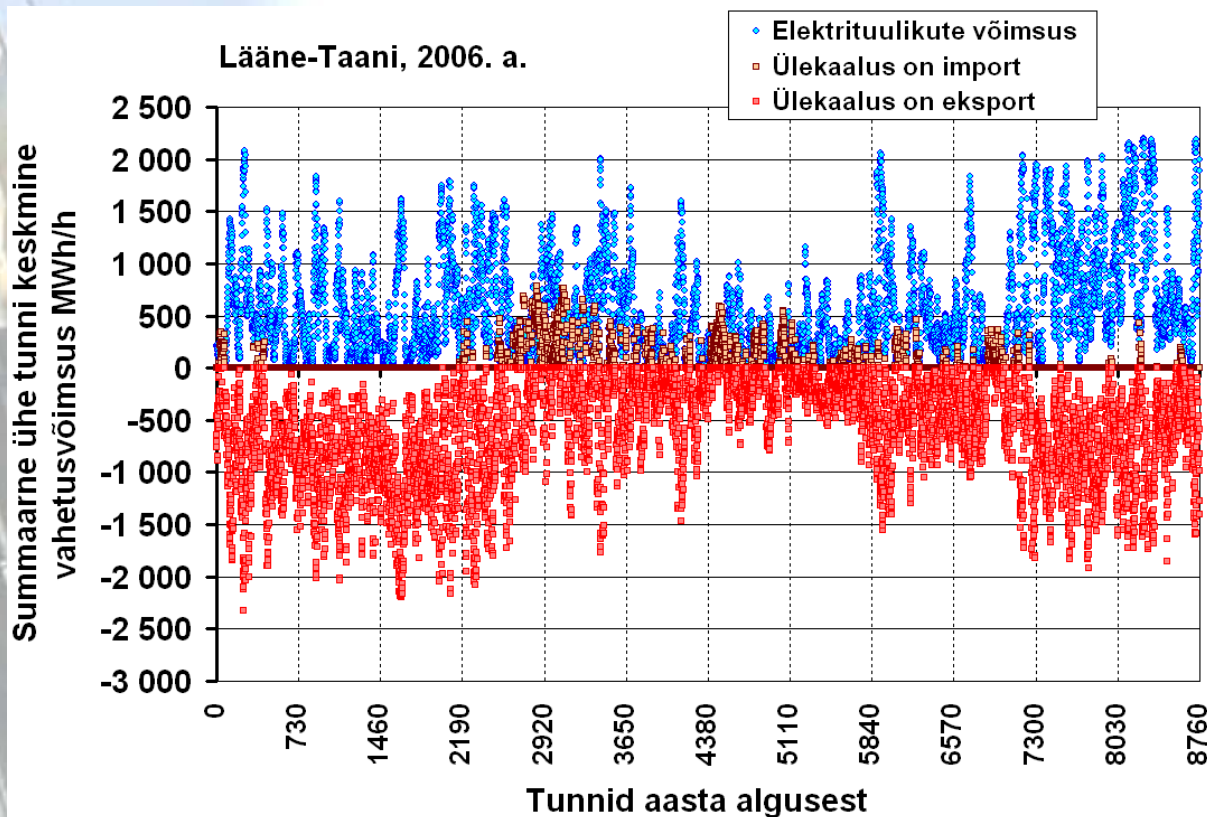
- Taanis veeressurss praktiliselt puudub nagu Eestiski. Siit siis ka paratamatu vajadus kasutada madalama kasuteguriga kondensatsioonielektriijaamu.



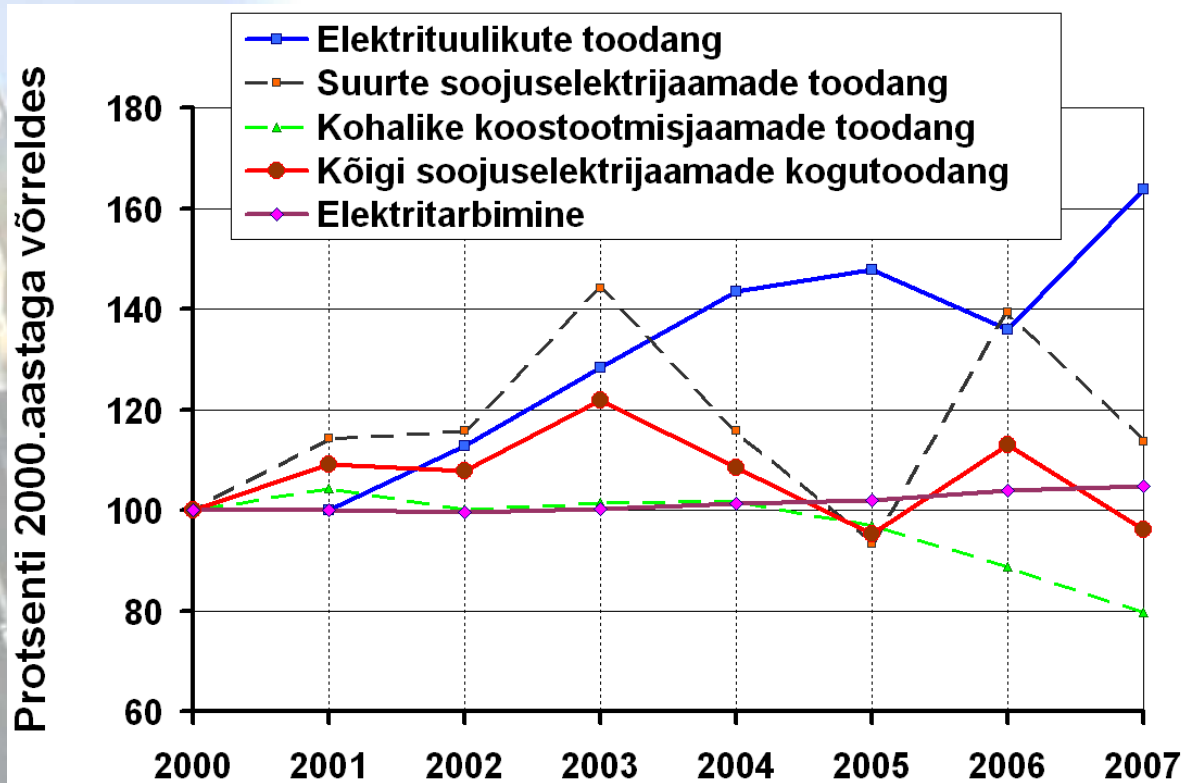
- Tuule juhuslik iseloom ei sobi just kõige paremini kokku elektritarbimise koormusgraafikute rütmilise iseloomuga. Päeval töötame, öösel magame ja puhkepäevadel puhkame. Elektritarbimise rütmilist muutumist iseloomustab joonisel

violetne tarbimisvõimsuse muutumise kõver.

- Elektrituulikute võimsuse muutumist ajas esitab samal joonisel sinine kõver. Jooniselt on väga selgelt näha, et need kaks kõverat omavahel ei taha kuidagi sobida ja süsteemioperaator on elektrituulikute toodangu suunanud peasjalikult ekspordile (roheline kõver on praktiliselt sinise kõvera peegelpilt). Lääne-Taani oma tarbimise katmiseks on kasutatud soojuselektrijaamu (punane kõver).



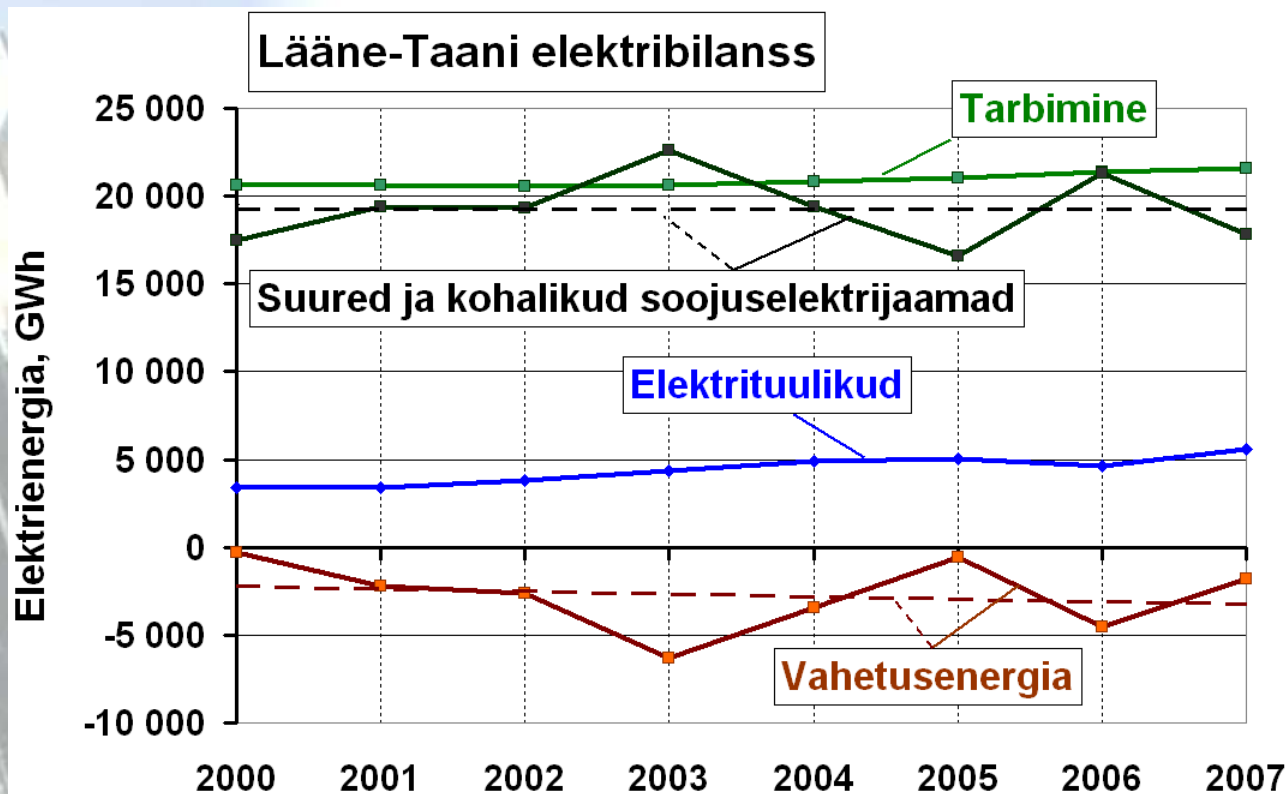
- Seda, et tegemist ei ole juhusega, näitab ka tervet aastat kajastav graafik. Elektri tuulike arendatava võimsuse suurenemine tuule tugevnemisel (sinised punktid) tingis peaaegu alati ekspordi suurenemise (punased punktid).
- Elektri importi (pruunid punktid) esines vähesel määral ja peamiselt suvekuudel.



- **Probleemidele vaatamata on Lääne-Taanis tuuleenergeetikat arendatud ennak-tempos. Alates aastast 2000 on kõige rohkem kasvanud elektrienergia tootmine, tervelt 63,8 % . Samal ajal on**

elektritarbimine suurenenud ainult 4,8 %.

- **Juurdekasvude erinevusest tulenevalt oleks soojuselektrijaamade tootmine pidanud vähenema, kuid ka see on keskmiselt hoopis suurenenud. 2007. aastal kõigi soojuselektrijaamade kogutootmine 2000. aastaga võrreldes veidi langes, kuid mitte suurte kivi-sõejaamade, vaid hoopis väikeste kohalike jaamade tootmuse vähenemise tagajärjel 80 protsendini 2000. a. tasemest.**

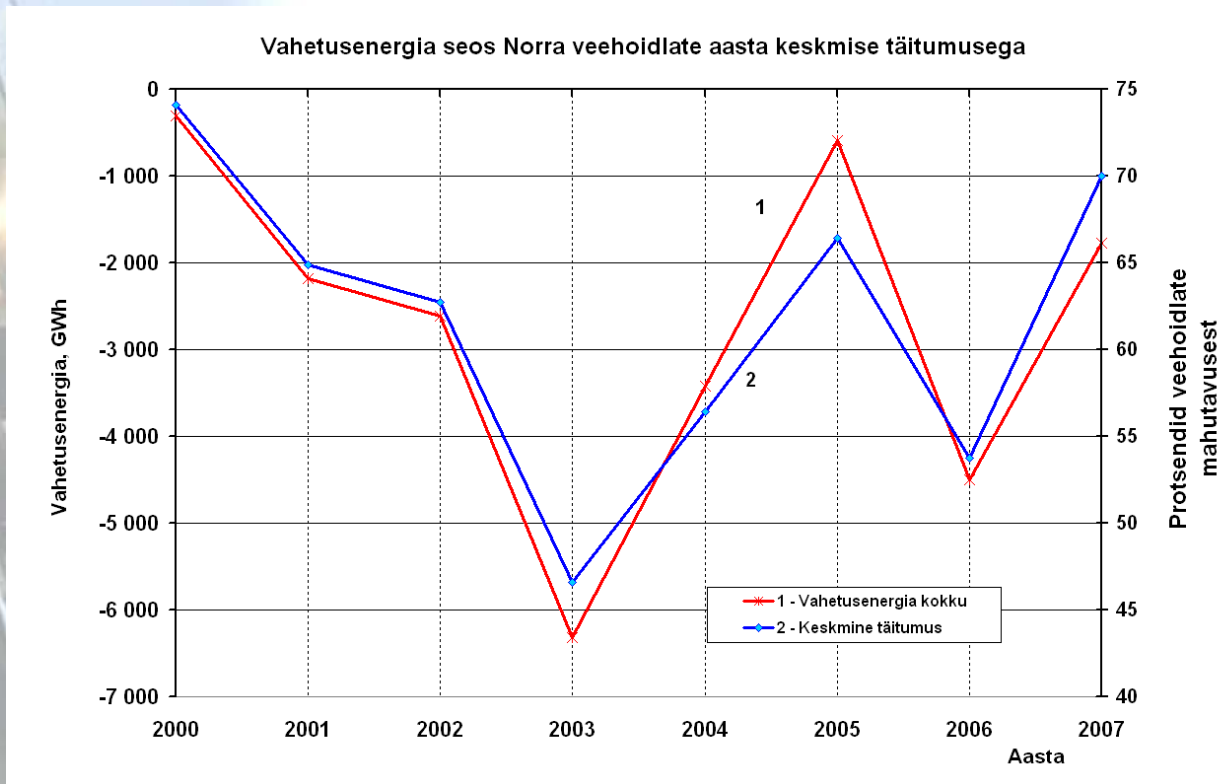


- Absoluutarvudes näevad erinevat tüüpi elektrijaamade toodangu muutused Lääne-Taanis välja joonise kohaselt. Suurte ja väiksemate kohalike soojuselektrijaamade, s.t kütuseid põletavate elektrijaamade toodang on aastate lõikes teinud läbi

suuri muutusi, kuid nende muutuste keskmine trend (graafikul kriipsjoon) püsib samal tasemel. Samas puudub elektritarbimise oluline kasv.

- Elektrituulikute toodang on samal ajavahemikul kasvanud 1,6 korda ja keskmisena on täheldatav üsna väike ekspordi suurenemine (graafikul pruun kriipsjoon).

- **Hinnanguliselt kaetakse Lääne-Taanis elektrituulikute toodangu abil erinevatel aastatel mitte rohkem kui 5 kuni 10% kohalikust elektritarbimisest, samal ajal statistikas näidatakse alati elektrituulikute kogutoodangu suhet kohaliku tarbimisse, mis on loomulikult oluliselt suurem. Näiteks 2006. aastal oli vastav arv ligikaudu 21,6 %. Ekspordi suhe elektritarbimisse oli samal ajal 21,0 %. Seega kütuste põletamise abil kaeti praktiliselt kogu oma elektrivajadus.**
- **Siit saab teha üsna pessimistliku järelduse, et elektrituulikute massiline kasutuselevõtt koos elektrituru avamisega ei ole Taanis vaatamata väga tugevatele sidemetele naaberriikide energiasüsteemidega suutnud kütuste (kivisüsi, maagaas, õli ja ka biokütused) põletamist pidurdada.**



- Analüüs näitab, et suurte soojus- ja elektrienergia aastatoodangute suured hüpped on tingitud veeseisust Norra hüdroelektrijaamade veehoidlates.

- Näiteks oli Norras väga kuival 2003. a. kevadine veeseis väga madal, veehoidlate täituvus oli ainult 10% ja Norra tarbis suurel hulgal Taani kivisöelektrijaamade elektrit



Elektrituulikute rajamisega seotud teisi probleeme

Üldine tendents on alahinnata elektrituulikute mõju keskkonnale, turvalisusele ja faunale. Järgnevas mõned tähelepanekud probleemidest.



TRAGIC END Blood stains (indicated by an arrow) on one of the blades of the wind turbine on Swansea Enterprise Park. Reports of a swan colliding with the turbine blade on Tuesday afternoon were supported by workers and the sight of bloodstained feathers on the ground.

ANZEWS/006



Swan takes fatal turn

For a company which prides itself on its green credentials, it must have come as a blow.

But for the bird that encountered the company's energy-saving generator, the blow was even greater — and proved to be fatal.

A swan made the unlucky choice of flying over the site of a deserted warehouse on the city's enterprise zone.

The site was formerly the home of

BY NINO WILLIAMS
nino.williams@swsp.co.uk

Montagne Jeunesse, an environmentally conscious company which boasts of its green credentials.

The company manufactures metal heavy products and processes what it produces.

It only uses biodegradable materials in manufacturing and recycles packaging wherever it can.

The policy proved so successful

commercially the company moved to large premises on Baglan Energy Park in Port Talbot.

Its former site stands empty as the company seeks tenants for the property.

Next to the main building stands a wind turbine, constructed by the company to generate electricity.

Yet even though the company left at the end of last year, the three-pronged, windmill-style turbine continues to turn periodically — as the unbacked swan discovered.

Some time on Tuesday, while flying with its flock, it took an unlucky turn and flew straight into the rotating blades — splintering the green company with scandal.

A spokesman for Montagne Jeunesse, which owns the site, said: "We were saddened to hear a swan had been killed after flying into the turbine while it was operational."

"The turbine has been operational at the site since July 2001.

"In all that time, we are glad to say, this is the only instance of a bird flying

into it. The turbine remains operational even though we are not occupying the site, because it supplies electricity into the grid for people to use without damaging the environment."

"The turbine, although a quiet version, normally makes enough noise to keep birds away."

"We can only surmise the swan had been scared."

"We will be looking into measures to make further noise, if possible while the turbine is in operation in order to prevent a recurrence."



Suured elektrituulikud on ohtlikud kaitsealustele röövlindudele ja luikedele. Eestisse paigaldatud elektrituulikute vähene hulk ei anna esialgu alust analoogsete järelduste tegemiseks meil.

Vt. <http://mark-duchamp.spaces.live.com/photos/>





Pilt Šotimaalt



Vaade Viru-Nigula tuulepargile Padaorust

Suurte elektrituulikute kohalik peab olema igakülgset kaalutud. Visuaalse mõju hindamisel peab hoolikalt lähtuma ruumilise planeerimise põhimõtetest. Ainult lähiümbrusele mõju arvestamisest alati ei piisa, võib tekkida isegi liiklusohtrikke olukordi.



Järeldusi

- **Tuuleenergia kasutamine ei lahenda süsihappegaasi emissioonide probleemi, vaid otse vastupidi võib seda oluliselt süvendada.**
- **Taani elektroenergeetika mudel ei ole Eestile sobiv ka selle pärast, et avatud elektriturul surub konkurents turuosalisi odavamate elektri tootmisviiside poole. Eesti tingimustes tähendaks see põlevkivi intensiivsemat kasutamist vaatamata suuremale süsihappegaasi heitele.**
- **Tugevad sidemed naabrite energiasüsteemidega ei ole olnud lahenduseks Taanis. Samasugune olukord kujuneb välja ka meil.**



Taani näite ja meie oma arvutuste põhjal on tuule otstarbekaks kasutuspiiriks 5% meie oma riigisisest elektritarbimisest, mis praegust tarbimistaset arvestades on ligikaudu 370...400 GWh. Sellise elektri hulga genereerimiseks võib Eestisse elektrituulikuid paigaldada koguvõimsusega enamalt 180 kuni 200 MW. Selle piiri ületamisel suurenevad soojuselektrijaamade CO₂-heited määrani, mil elektrituulikute süsteemi heide ületatakse. Samasugune olukord tekib ka kütusekuluga.

Eesti peab paratamatult riiklikult kehtestama elektrituulikute ülesseadmise võimsuspiirangu.





Täna tähelepanu eest !

