

## Õhu vägi rannikualal

Tuul ja kuidas seda iseloomustada

Läänemere ja Soome lahe  
tuuletingimuste spetsiifikast

Vaatekoht / metoodiline alus:  
olemasolevad tuuleandmed

(põhjuslikud seosed – üldise meteoroloogia kursusest)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Rannaprotsesside mootorid

- Päikese kiirgus: 1370 W/m<sup>2</sup> (340 W/m<sup>2</sup>)
- Ebaühtlane soojenemine → tuul & hoovused
- Maa pöörlemine → Coriolise jõud
- Atmosfäär: keerised (tsüklonid, antitsüklonid)
- Ookean: piiratud randadega, mis mõjutavad tuuli

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Mere ja atmosfääri vaheline  
energia ja massi vahetus:

- ⌘ Kiirgus
- ⌘ Aurumine/kondenseerumine
- ⌘ Impulsi ülekanne ~ tuul

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## TUUL

(puhub sealt, kust tema tahab, aga mitte sealt,  
kust **meile sobiks**)

Mõjutab rannikut mitmel moel

- Hoovused (kaugmõju)
- lained (kaugmõju),
- liigutab pinnast
- tekitab tuule-erosiooni
- 'ehitab' luiteid

Rannik mõjutab tuult

- Otseselt: erineva karedusega pinnad: mets, järsakud
- kaudselt: maa/mere erinev temperatuur → briis, õhumasside liikumise üldine muster

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Tuul on igal hetkel ja igas kohas  
(i) anisotroopne: puhub konkreetselt suunast  
(ii) kirjeldatav vähemalt kahe parameetriga (vektor)

Tuult iseloomustavad  
Kiirus  
Suund



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tuult iseloomustavad:

- Keskised parameetrid (kiirus? suund?)
- Jaotus suundade järgi
- Ekstreemsed parameetrid (incl. maksimaalne kiirus eri suundadest)
- Kestvus
- Puhangulisus
- Ajaline dünaamika
- Ruumiline dünaamika

Üldisem

Täpsem

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Klassikalise tuuleandmed: andmete homogeensuse ja esinduslikkuse mure

- Iga 3 (6) tunni tagant vähestes punktides
- 10 minuti keskmine (varem 2 minuti)
- tuulelipuga silma järgi (kuni ca 1970)
- anemorumbomeeter alates 1970
- automaatne registreerimine alates 199?
- 8 rumbi kuni ca 1970
- 16 rumbi (?) ca 1970-1990
- 36 rumbi alates ca 1990

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tuult iseloomustavad:

Keskised parameetrid (**kiirus?** suund?)

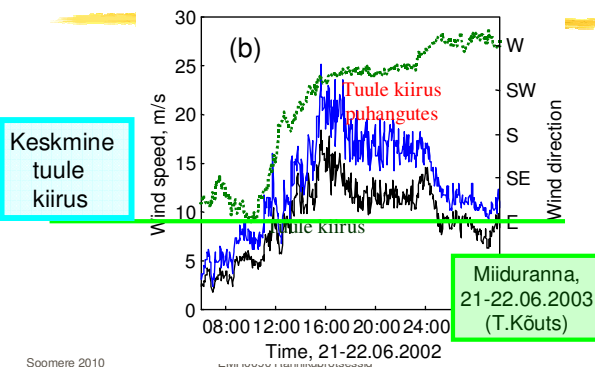
Üldisem

Täpsem

Soomere 2010

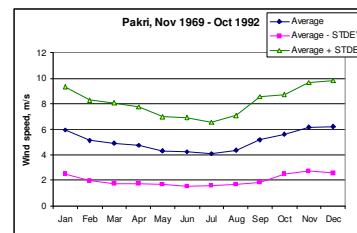
EMH0090 Rannikuprotsessid

## Mõõdetud tuul: muutub pidevalt



Soomere 2010

## Keskmine: sõltub definitsioonist ning muutub ruumis ja ajas



Tuule kiiruse sesoonne muutlikkus: Pakri

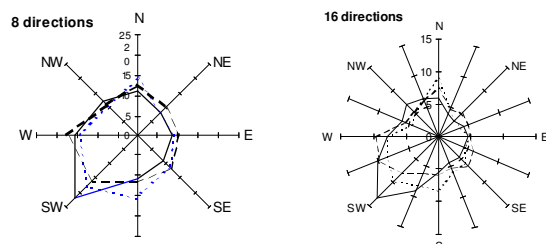
Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tuult iseloomustavad:

Keskised parameetrid (**kiirus?** ~~suund?~~)

Jaotus suundade järgi: tuuleroos



Pidevjoon: Näsudden, katkendjoon: Ristna, punktiir: Vilsandi

## Tuult iseloomustavad:

Keskised parameetrid (**kiirus?** suund?)

Jaotus suundade järgi

Ekstreemsed parameetrid (incl. maksimaalne kiirus eri suundadest)

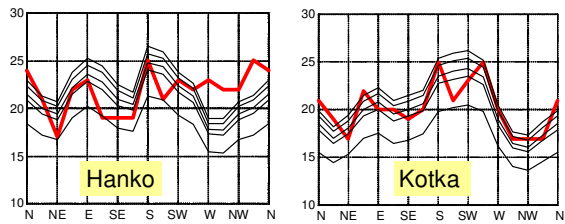
Üldisem

Täpsem

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Ekstreemne tuul: erinev eri suundadest



- Maksimaalne tuule kiirus erinevatest suundadest: mõõdetud 1960-2000 (punane) ja hinnatud kord 1, 10, 20, 50 või 100 aasta kestel
- (Üsna tundlik suurus)

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tuult iseloomustavad:

Üldisem

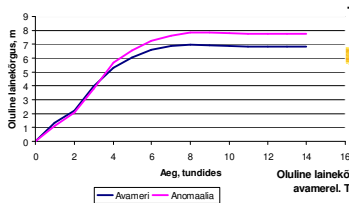
Keskised parameetrid (**kiirus?** suund?)  
 Jaotus suundade järgi  
 Ekstreemsed parameetrid (incl. maksimaalne kiirus eri suundadest)  
 Kestvus

Täpsem

Soomere 2010

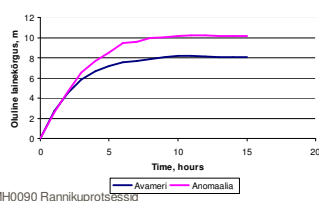
EMH0090 Rannikuprotsessid

Oluline lainekõrgus anomaalia piirkonnas ja avamerel. Tuul 25 m/s puhub kirdest (15°)



Tekkiva lainetuse intensiivsus: sõltub tuule kestvusest üsna keerukal moel

Oluline lainekõrgus anomaalia piirkonnas ja avamerel. Tuul 25 m/s puhub läänest



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tuult iseloomustavad:

Üldisem

Keskised parameetrid (**kiirus?** suund?)  
 Jaotus suundade järgi  
 Ekstreemsed parameetrid (incl. maksimaalne kiirus eri suundadest)  
 Kestvus  
 Puhangulisus  
 Ajaline dünaamika

Täpsem

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

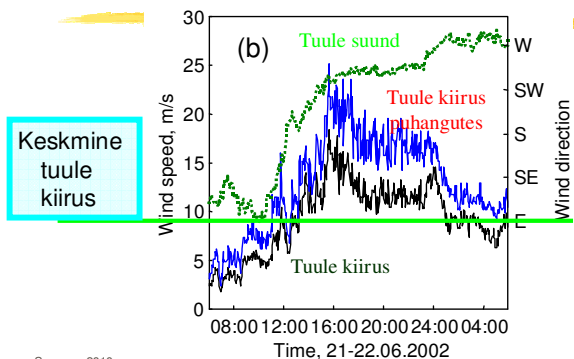
## Puhangulisus: oluline lainete jaoks

- Aadria merel: kaks võimalikku tugevat tuult
  - Üks väga ühtlane → lainekõrgused tagasihoidlikud (võrreldes tuule kiirusega)
  - Teine: väga puhanguline → suhteliselt kõrged lained
- Põhjus: laineid tekitab tuule / õhurõhu ebaühtlus

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Puhangulisus & ajaline dünaamika



Soomere 2010

## Tuult iseloomustavad:

Üldisem

Keskised parameetrid (**kiirus?** suund?)  
 Jaotus suundade järgi  
 Ekstreemsed parameetrid (incl. maksimaalne kiirus eri suundadest)  
 Kestvus  
 Puhangulisus  
 Ajaline dünaamika  
 Ruumiline dünaamika

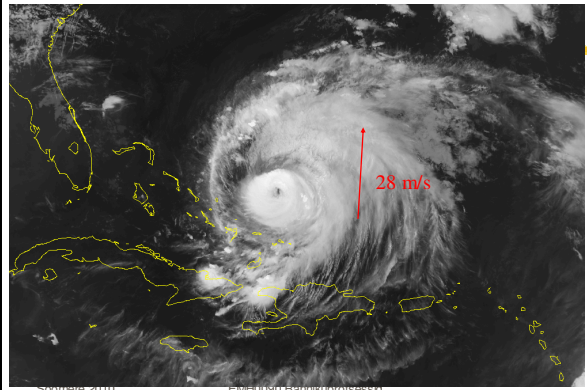


Täpsem

Soomere 2010

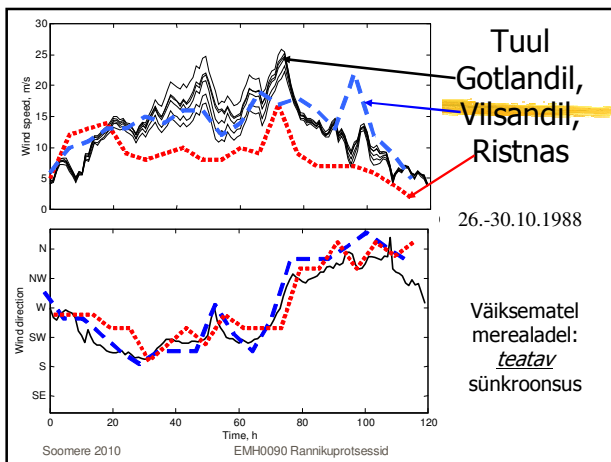
EMH0090 Rannikuprotsessid

Tuul suurtel merealadel: – puhub igas kohas ise suunast



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

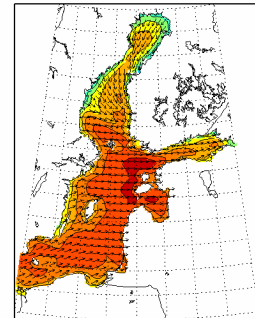


Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Tuulemusterid  
 Läänemerele:  
 prognoos 7.  
 jaanuari  
 hilisõhtul:  
 sünkroonsus  
 kogu  
 Läänemerele  
 võib tähendada  
 ekstreemset  
 tormi

Wind at 10m (m/s): 2005 JAN 09 at 08z



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

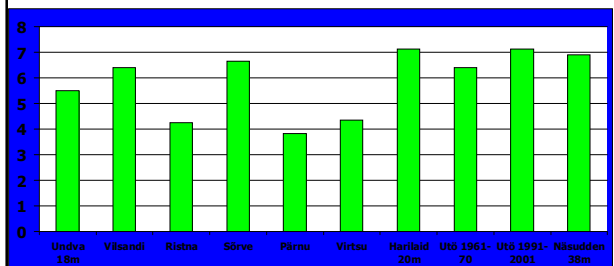
## Tuuleandmete analüüsi elemente

ehk mõned matemaatilise statistika lihtsad rakendused

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Tuule keskmine kiirus (ühes punktis): elementaarne matemaatika  
*varieerub kõvasti piki Eesti randa*

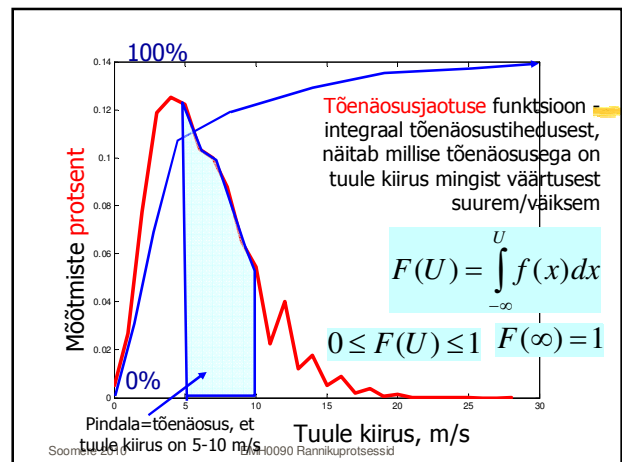
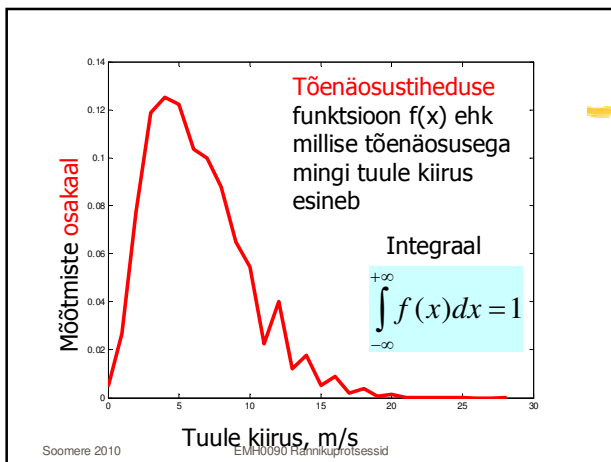
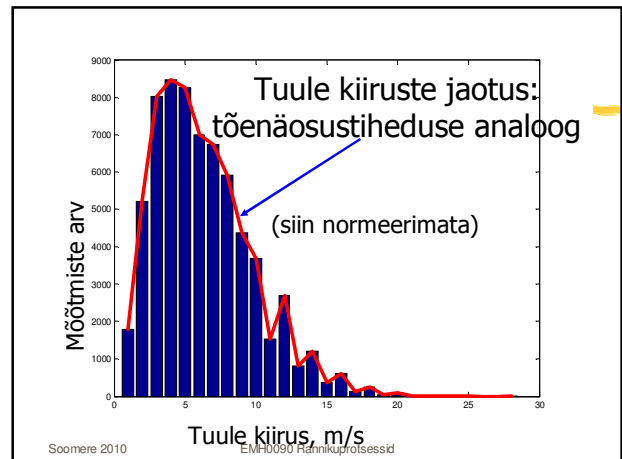


Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veidi täpsem statistika ehk kui sageli on mingi kiirusega tuult oodata: Vilsandi 1969-1999

Tuule kiirus, m/s	Möödetud	Tuule kiirus, m/s	Möödetud
0	356	9	4381
1	1799	10	3684
2	5216	11	1513
3	8030	12	2699
4	8473	13	820
5	8254	14	8254
6	7003	15	1203
7	6746	16	354
8	5934	17	595



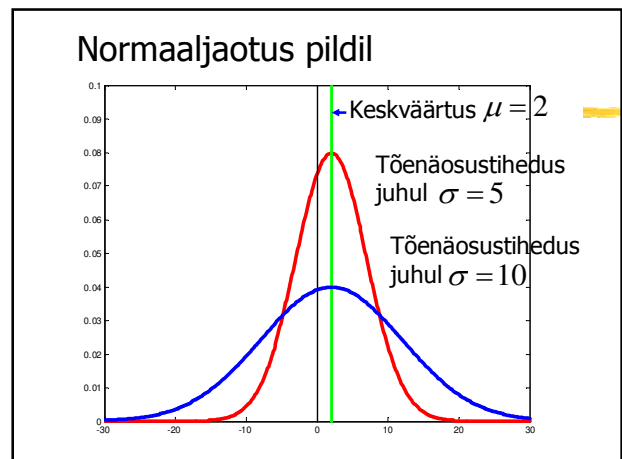
### Tuntud jaotused: normaaljaotus

tõenäosustihedus  $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$

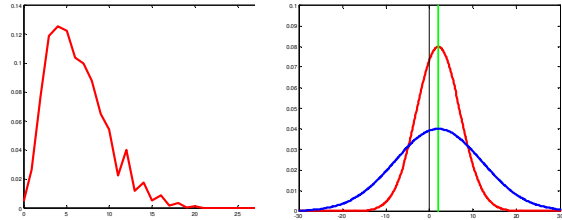
Keskvärtus ehk matemaatiline ootus:  $\mu$

Dispersioon ehk hajuvus ehk ruutkeskmine erinevus keskvärtusest: keskvärtus suurusest  $(x-\mu)^2$

(kui keskvärtus on null, nagu pinnalainete puhul, siis lihtsalt ~mõõtmistulemuste ruutude keskmine; iseloomustab tulemuste hajuvust keskmise suhtes)



## Tuule kiiruse jaotuse kirjeldamiseks normaaljaotus ei sobi



Oluline (kuid mitte ainus) põhjus: normaaljaotus on sümmeetriline mingi punkti suhtes

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Märksa paremini sobib Weibulli (Gnedenko) jaotus

$$f(u) = ku^{k-1}b^{-k} \exp\left[-\left(\frac{u}{b}\right)^k\right]$$

Weibulli jaotusel astmenäitaja üldisem

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Weibulli jaotuse tihedusfunktsioon võrdeline  $x$ -ga teatavas astmes –

Mõlemad on  
(i) eksponentfunktsioonid  
(ii) sisaldavad kaht parameetrit

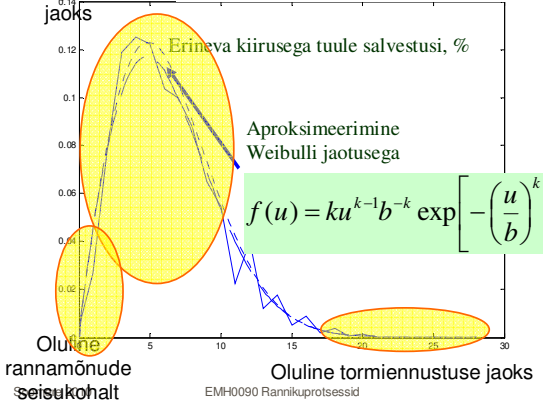
ebasümmeetriline,  $=0$ , kui  $x=0$  (nagu Poissoni jaotus)  
K-täisarv, lambda – keskval.

$$f(x) = \frac{\lambda^k}{K!} e^{-\lambda x}$$

Soomere 2010

EMH0C

## Tuule kiiruste jaotus



Oluline rannamõnude seisukohalt

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Vaid kaks parameetrit?

Aproksimeerimine Weibulli jaotusega  $f(u) = ku^{k-1}b^{-k} \exp\left[-\left(\frac{u}{b}\right)^k\right]$

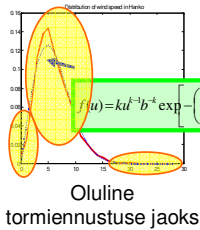
$k$  - kuju parameeter;  $k=1 \rightarrow$  eksponentsiaaljaotus parameetriga  $b$   
 $k=2$  - Rayleigh jaotus (William Strutt, Lord Rayleigh).  
 $b$  - scale/slope parameter (mastaabikordaja? Nõlva kalle?)

Parameters of the Weibull distribution	b		k	
	Vilsandi	Näsudden 38 m [18]	Vilsandi	Näsudden 38 m [18]
Direction/Measurement site				
All winds	7.235	7.8	2.048	2.06
20°	6.6461	-	2.1892	-
45°	6.1484	6.5	2.1508	2.12
70°	5.2475	5.5	2.3199	-

Soomere 2010

EMH0C

## Ekstreemsed tuule kiirused: üsna lihtsalt hinnatavad?



$$f(u) = ku^{k-1}b^{-k} \exp\left[-\left(\frac{u}{b}\right)^k\right]$$

Tõenäosus selleks, et tuule kiirus ületaks kiiruse  $U$  m/s: integraal  $[f(u)]$  vahemikus  $[U, \infty)$

$$P_{u>U} = F(U) = \exp\left[-\left(\frac{U}{b}\right)^k\right]$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Weibulli jaotuse parameetrid?

$M\{u\} = b\Gamma(1 + 1/k)$  Tuule keskmine kiirus  
 $M\{u^2\} = b^2\Gamma(1 + 2/k)$  Tuule kiiruse ruutude keskmine

Mõõtmisintervall  $N$  tundi

Maksimaalne tuule kiirus  $N$  tundi kestvas tormis ajavahemikul  $N_{hours}$ :  $U$  võrrandist

$$P_{u>U} = N/N_{hours} \quad P_{u>U} = F(U) = \exp\left[-\left(\frac{U}{b}\right)^k\right]$$

Gamma-funktsioon  $k=2$  (Rayleigh jaotus)

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx$$

$$\Gamma(n+1) = n!$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Lihtne erijuht: Rayleigh jaotus (kuju parameeter  $k=2$ ,  
tüüpiline Lääne/Põhja-Euroopa tuulte statistikas)

$M\{u\} = b\Gamma(1+1/k)$   $k=2$ , vaja leida vaid üks  
parameeter – piisab tuule  
keskmisest kiirusest

$$\Gamma(n+1) = n!$$

$$\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{1}{2}\sqrt{\pi}$$

Mõõtmisintervall N tundi

Maksimaalne tuule kiirus N tundi kestvas  
tormis ajavahemikul  $N_{\text{hours}}$ : U võrrandist

$$P_{u>U} = N/N_{\text{hours}} \quad P_{u>U} = F(U) = \exp[-(U/b)^k]$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Seega jõudsime lihtsa meetodini ekstreemsete tuule kiiruste hindamiseks

- (i) Leida tuule kiiruse keskväärtus ja tuule kiiruse ruutude keskmine
- (ii) Arvutada Weibulli jaotuse parameetrid (suhteliselt keerukas, aga teostatav katse-eksituse teel, või mõne programmeerija abiga)
- (iii) Leida formaalne tõenäosus, et tuul ületab mingi väärtuse  $U$
- (iv) Interpreteerida seda tõenäosust vastavalt olemasolevate andmete iseloomule (mitu korda päevas mõõdetud jne.)
- (v) Kui on tarvis leida max. kiirus näiteks 1x50a, proovida erinevate  $U$  väärtustega – või paluda appi matemaatik
- (vi) Vajadusel teha sama erinevate suundade jaoks

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Prooviks lahendada ülesannet...

Vilsandil on 1969-1999 tuuleandmete alusel (mõõdetud 8 korda päevas) leitud, et Weibulli jaotuse parameeter  $k= 1.8994$  ja tuule keskmine kiirus 6.3 m/s.

Hinnata maksimaalset tuule kiirust (3 tunni keskmisena) üks kord 50 aasta jooksul.

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

$$M\{u\} = b\Gamma(1+1/k) = 6.3 \quad k=1.8994$$

$$\Gamma(1+1/k) = 0.8874 \quad b=7.0996$$

Aastas  $365 \cdot 8 = 2920$  mõõtmist

50 aastat  $\approx 365 \cdot 8 = 146\,000$  mõõtmist

Otsime tuule kiirust  $U$ , mille ületamise tõenäosus oleks  $\sim 1/146000$

$$P_{u>U} = F(U) = \exp[-(U/b)^k] = 1/146000$$

$$-(U/b)^k = \ln\left(\frac{1}{146000}\right)$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

$$(U/b)^k = 11.8914$$

$$\ln(U/b) = \frac{\ln 11.8914}{k} = 1.3035$$

$$U/b = e^{1.3035} = 3.6822$$

$$U = 3.6822 \times b = 26.1421 \text{ m/s}$$

Tegelikult mõõdetud 30 a jooksul: 3x25 m/s, ei ühtegi korda 26-27 m/s, 5 korda 28 m/s, suuremaid pole mõõdetud

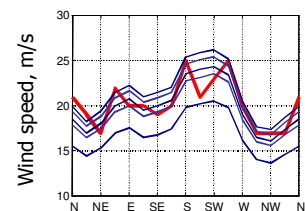
?? 28 m/s on ehk veidi liialdatud kolme tunni keskmisena??

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Teooria ja tegelikkus: ???

Kotka



Punane: mõõdetud 1961-2001

Sinine: hinnatud 1xaastas, 10a, 20a, 50a, 100a

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Veidi modifitseeritud ülesanne:

Vilsandil on 1969-1999 tuuleandmete alusel (mõõdetud 8 korda päevas) leitud, et Weibulli jaotuse parameeter  $k = 1.8994$  ja tuule keskmine kiirus  $6.3$  m/s.

VAREM: Hinnata maksimaalset tuule kiirust (3 tunni keskmisena) üks kord 50 aasta jooksul.

Vastus:  $26.1$  m/s

NÜÜD: Hinnata maksimaalset tuule kiirust 10 minuti keskmisena üks kord 50 aasta jooksul, lugedes olemasolevad mõõtmistulemused juhuslikult jaotunuks

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

$$M\{u\} = b\Gamma(1 + 1/k) = 6.3 \quad k = 1.8994$$

$$\Gamma(1 + 1/k) = 0.8874 \quad b = 7.0996$$

Tunnis 6 kümneminutilist lõiku, päevas 144  
Aastas keskmiselt  $365.25 \cdot 144 = 52596$  lõiku  
50 aastat  $\sim 52596 \cdot 50 = 2629800$  sellist lõiku

Otsime tuule kiirust  $U$ , mille ületamise tõenäosus oleks  $\sim 1/2629800$

$$P_{u>U} = F(U) = \exp\left[-(U/b)^k\right] = 1/2629800$$

$$-(U/b)^k = \ln\left(\frac{1}{2629800}\right) \quad (\text{ainus erinevus})$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

$$(U/b)^k = 14.7824$$

$$b = 7.0996$$

$$\ln(U/b) = \frac{\ln 14.7824}{k} = 1.4180$$

$$U/b = e^{1.418} = 4.1287$$

$$U = 4.1287 \times b = 29.3 \quad \text{m/s}$$

Tegelikult mõõdetud 30 a jooksul:  $3 \times 25$  m/s, ei ühtegi korda  $26-27$  m/s, 5 korda  $28$  m/s, suuremaid pole mõõdetud

??  $28$  m/s on ehk veidi liialdatud kolme tunni keskmisena??

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Aga  $29-30$  on OK 10 minuti keskmisena

## Mõned (vaikimisi) tehtud eeldused ehk veealused karid:

- (i) Tuule kiiruse andmed: kas ka tegelikult peegeldavad tuule omadusi mõõtmiskordade vahel?
- (ii) Kas Weibulli jaotus peegeldab piisavalt hästi väga tugevate tuulte omadusi (Gumbeli jaotus?)
- (iii) Prognoositav ajavahemik ei tohiks väga palju ületada andmetega kaetud ajavahemiku pikkust
- (iv) Saadud hinnang baseerub statistikal, kuid ekstreemsed tormid on üksikjuhtumid, millel oma käitumise loogika – ja see ei pruugi kajastuda statistika
- (v) Erinevate suundade jaoks võib saada ebamõistlikke tulemusi: andmeid palju kordi vähem, ja ühest suunast puhuv tuul ei saa olla kangem kui üldine maksimum
- (vi) (aga muidugi on olemas ka üldine meetodika nende ühtlustamiseks)

Gumbeli jaotus: tegelikult sobib paremini ekstreemsete asjade jaoks

$$f(x) = \frac{1}{b} e^{\pm \frac{x-\gamma}{b}} e^{-e^{\frac{x-\gamma}{b}}}$$

$$F(x) = \frac{k}{b} \left(\frac{x-\gamma}{b}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{b}\right)^k\right]$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Ekstreemsete tuulte hinnang Weibulli jaotuse parameetrite alusel

- Eeldab, et andmed peegeldavad hästi tuule kiirust 3 (6) tunni kestel
- Väga ligikaudne – väga tugevate tuulte esinemissagedus ei pruugi alluda Weibulli seadusele (Gumbeli jaotus!)
- Väheusaldatav üksikute suundade jaoks, kus mõõteandmeid vähe ja tulemused indikatiivsed
- Aga sobib suhteliselt sageli esinevate tuulte jaoks
- Oluline pluss: sobib kiirhinnanguks  $b$  ja  $k$  baasil

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid



## Üldine idee & tegevusplaan:

- (i) Andmestiku analüüsi oluline samm: aproksimeerimine suht. lihtsa funktsiooniga (tõenäosusjaotusega)
- (ii) Leida selle jaotuse parameetrid (tavaliselt üks või kaks)
- (iii) Nende parameetrite ja tolle lihtsa funktsiooni abil leida ekstreemsete väärtuste hinnang (=kasutades olemasolevat matemaatilist aparati)
- (iv) Kontrollida tulemust kaine mõistuse abil

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tegelikult ...

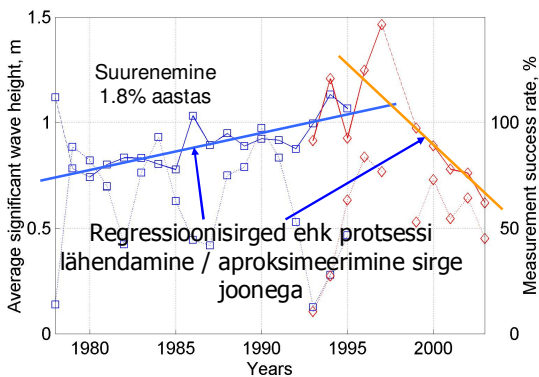
On see vaid üks samm edasi regressioonianalüüsil baseeruvatest mudelitest

Elmises loengus: oli juttu pikaajalistest muutustest rannikuprotsesse liikumapanevates jõududes

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Lainekõrguse muutlikkus (Almagrundet, 1978-2003, Broman et al., 2006, Oceanologia)



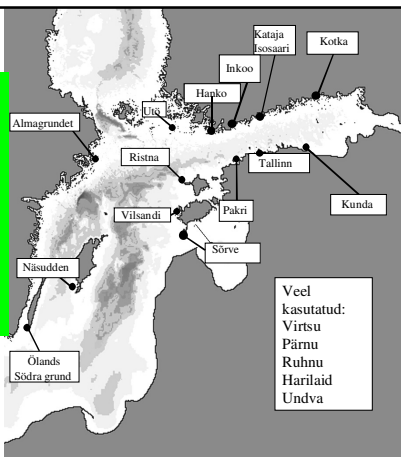
## Tuuled Läänemeresel ja Soome lahel

NB!! Eeldatakse, et mõõdetud tuuleandmed peegeldavad tuule keskmisi omadusi 3 või 6 tunni vältel!

Soomere 2010

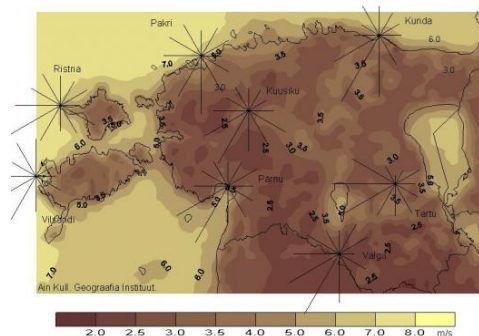
EMH0090 Rannikuprotsessid

Mõned meteo-jaamad, mille andmeid on analüüsis tarvitatud



Soomere 2010

## Tuule keskmine kiirus Eestis



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

tuulepargid.ee

## Tuule keskmine suund?

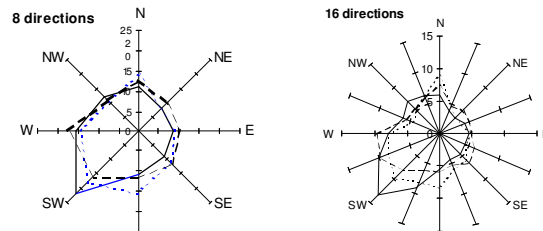
mõttetus  
(tuul on vektor!)  
(Saame rääkida  
komponentide  
keskväärtusest)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tuuleroos - eri suundadest puhuvate tuulte sagedus polaarkoordinaatides

- on suhteliselt väheinformatiivne (kuigi näitab, et tuuled Läänemeres puhuvad sagedamini kindlastest suundadest)



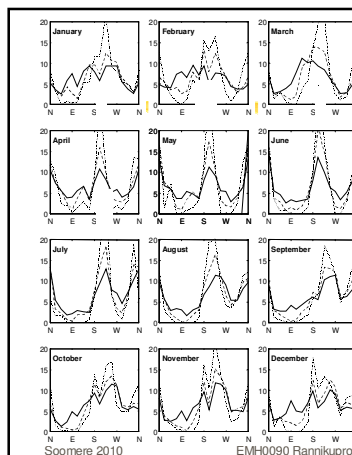
Pidevjoon: Näsudden, katkendjoon: Ristina, punktjoon: Vilsandi

## Klassikaline Läänemere tuule klimatoloogia (tuuleatlased jne. ...)

- Tingitud õhurõhu suuremastabiilsusest horisontaaljaotusest: Islandi madalrõhkkond + Siberi kõrgrõhkkond,
- Selgepiiriline talvel, vähem tuntav suvel
- Tuul puhub nõnda, et madalam rõhk on vasakul → seetõttu domineerivad S+SW tuuled
- Sesonne muutlikkus: sügisel tuule kiirus suurem kui kevadsuvel

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid



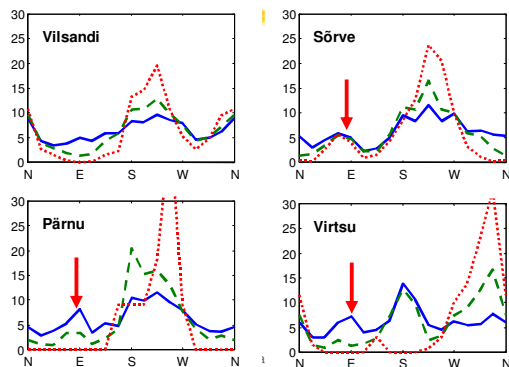
Vilsandi: edelatuulte esinemissagedus aastaegade lõikes vastupidine klassikalise teooria ennustustele: tugevamad edelatuuled domineerivad kevadel ja suvel, mitte sügisel ja talvel

Pidevjoon: kõik tuuled  
Katkendjoon: 6m/s ja enam  
Punktjoon: üle 10m/s

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

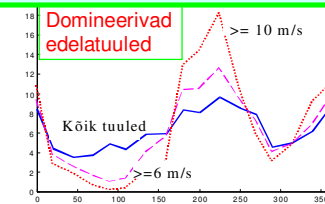
## Läänemere erinevates piirkondades on tuule struktuur erinev!!!



## Märgatavat lainetust & hoovuseid tekitavad mõõdukad ja tugevad tuuled, mis on anisotroopsed: puhuvad sagedamini kindlast suunast (suundadest)

Erinevatest suundadest puhuvate tuulte esinemissagedus protsentides (nimetame ka tuule struktuuriks) (Vilsandi 1976-1991)

Järeldus: Nõrkade tuulte analüüs on ajaraiskamine & risustab pilti



Soomere 2010

Nurk kraadides põhjasuunast (90°=ida)

## Utö saar 1961-2001 mõõdetud üks kord kolme tunni kohta



Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

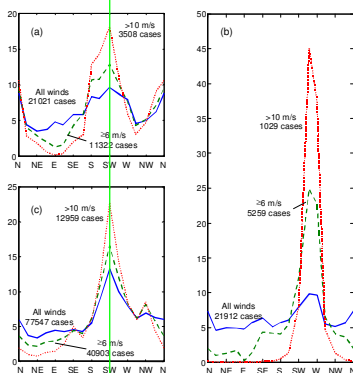
## Läänemere tuulte anisotroopia I:

- Kõigi tuulte hulgas domineerivad edelatuuled (ammutatud tõde)
- Mõõdukad ja tugevad tuuled on oluliselt enam anisotroopsed kui kõik tuuled (hästi teada fakt)
- Mõõdukate ja tugevate tuulte jaotus Läänemere idarannal on kahetipuline
  - Domineerivad edelatuuled; sekundaarne tipp vastab põhja- ja põhjaloode (NNW) tuultele (ekspertidele teada; kirjanduses kajastatud 2001)

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

### SW tuuled

Vilsandi



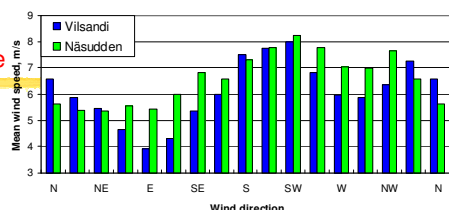
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

## Läänemere tuulte anisotroopia II:

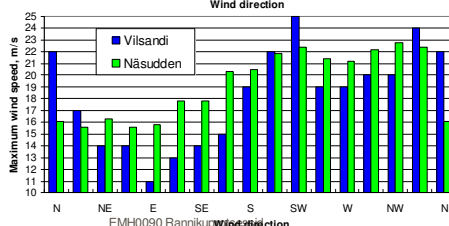
- Mõõdukate ja tugevate tuulte jaotuses Läänemere idarannikul on nõrgalt esindatud ida- ja kirdetuuled
  - (traditsiooniline selgitus: Eesti ja Soome mandriosa summutab neid tuuli)
- Ka Läänemere läänerannikul on mõõdukate ja tugevate tuulte jaotus kahetipuline; domineerivad täpselt samad tuuled nagu idarannikul
  - seega meri mõjutab tuuli mingil keerukamal moel

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Keskmine tuule kiirus



Maksimaalne tuule kiirus



Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

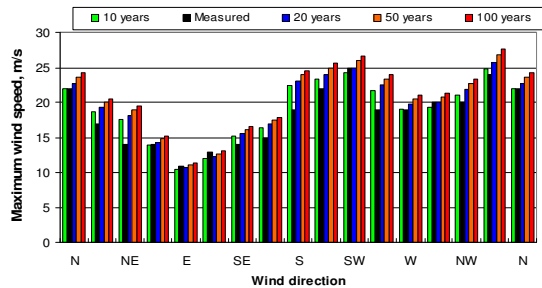
## Läänemere avaosa tuulte anisotroopia III: (Vilsandi ja Sørve andmete põhjal, mida on võrreldud Gotlandi andmestikuga)

- Mõõdukate ja tugevate tuulte seas domineerivad edela- ja NNW tuuled
- Loodetuulte esinemissagedus ja tugevus suhteliselt väike
- Tugevaid kirde- ja idatuuli esineb väga harva
- Erand: Soome lahega piirnev mereosa:
  - Soome lahel ja Botnia merel tekkinud tuuled jõuavad ka Rootsi lähiste

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tuul Saaremaa ja Hiiumaa läänerannikul

puhub eri suundadest erineva tugevusega



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

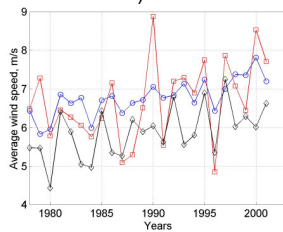
## Tuul: muutub ajas ja ruumis

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Pikaajaline ja sesoonne muutlikkus

Osalt tegelik (Utö 1961-2000)

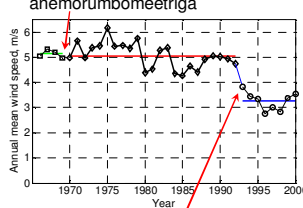


Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Osalt meie endi kätetöö (Pakri 1966-2000)

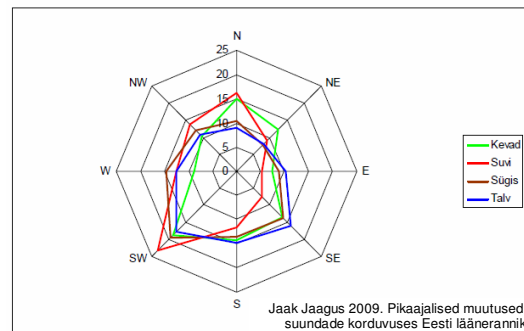
Tuulelipp asendati anemorumbomeetriga



Jaam koliti teise kohta

Keevallik and Soomere, Estonian Journal of Engineering, 2009, 15, 3, 227-239

## Tuule suuna sesoonne muutlikkus



Jaak Jaagus 2009. Pikaajalised muutused tuule suundade korduvuses Eesti läänerannikul.

Joonis 2. Aastaaegade keskmised tuuleroosid Vilsandis ajavahemikul 1966-2005. Tuule suundade korduvuses on väljendatud protsentides.

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

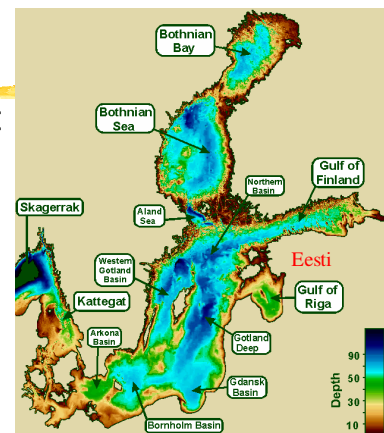
## Rannik versus vee- ja õhumassid ehk identiteedi küsimus

- Troopilised/polaarsed (õhu- ja veemassid), merelised/kontinentaalsed (õhumassid)
- Kindlate omadustega & püsivad
- (Liikumise) püsivuse kadumine → segunemine (tsüklogenees etc., vt. S.Keevalliku loeng)
- Rand: takistus nii veele kui õhumassidele
- → rannavööndis sageli ka atm.fronidid
- Tormid liiguvad piki vett & randa

Soomere 2010

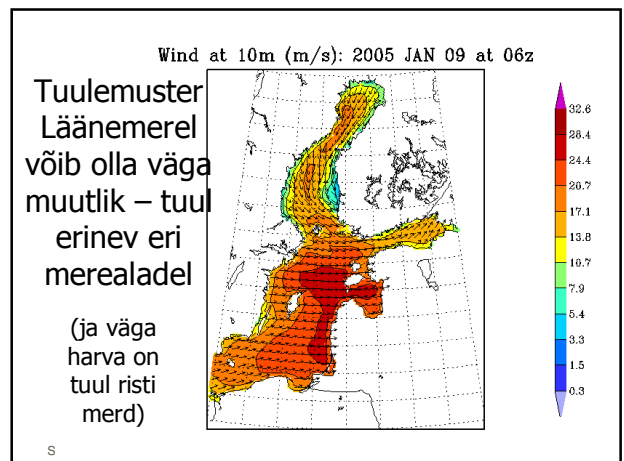
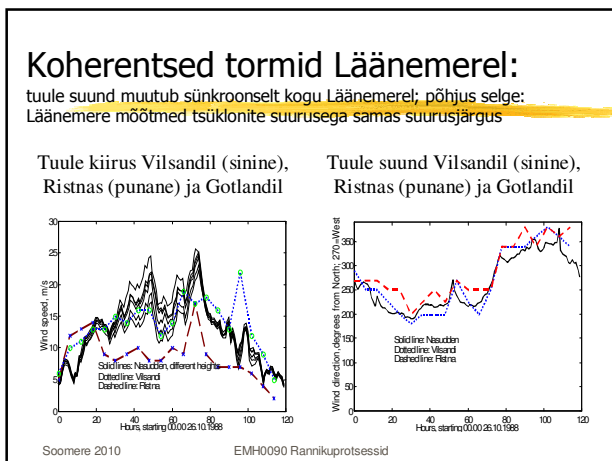
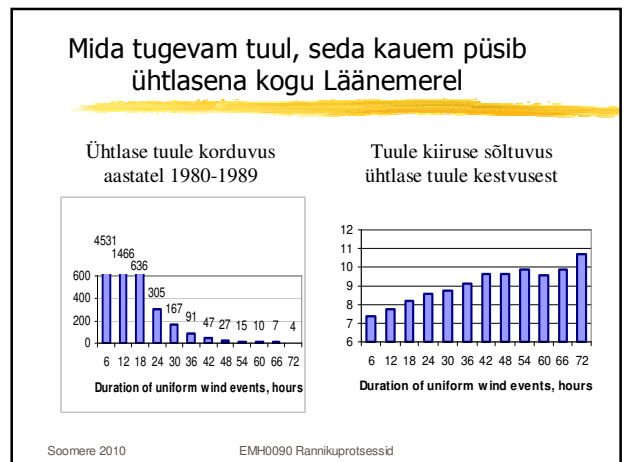
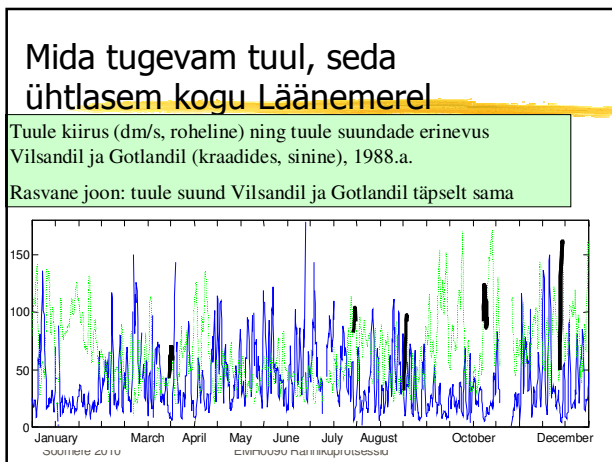
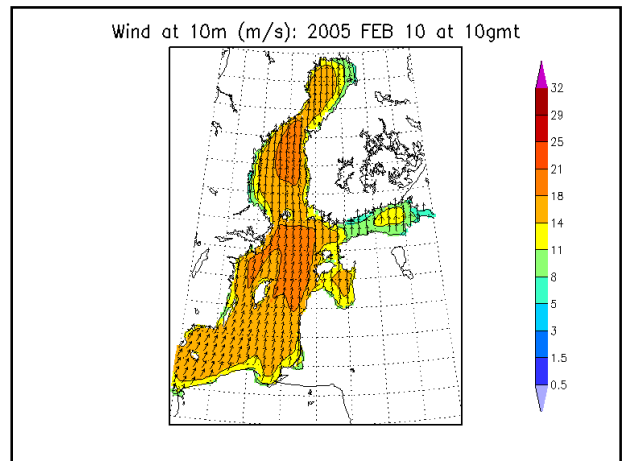
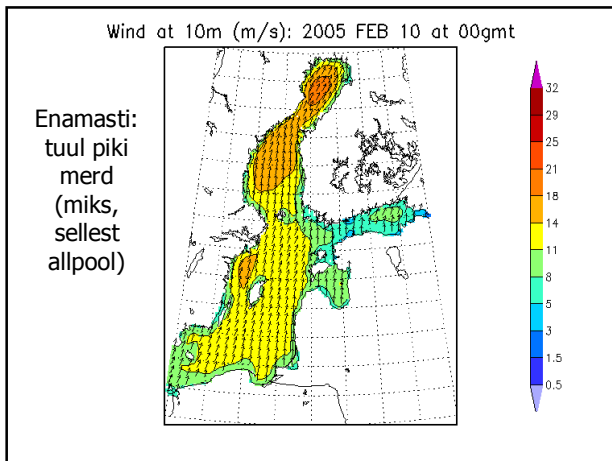
EMH0090 Rannikuprotsessid

Läänemeri kõrgelt ülalt – mõjutab tuult üsna tugevasti: eri kohtades võib tuul olla erinev küll



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid



## Mereline tuul ja maismaa tuul

Mereline tuul:

- mere pind on ühtlane, seega tuul merel põhiliselt määratud õhurõhu horisontaaljaotusega (tsüklonid, antitsüklonid, frondid)

Tuul maismaal:

- pind väga ebaühtlane (metsad, mäed, majad, orud, järsakud); seetõttu oluliselt mõjustatud pinnareljeefist

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Merelist tuult iseloomustavad & eristavad tuulest maismaal:

- Suhteliselt suur tuule kiirus
  - Eestis: merel 6-8 m/s; maismaal 4-6 m/s
- suhteliselt väike kiiruse ööpäevane muutlikkus
- nõrkade, mõõdukate ja tugevate tuulte esinemissageduste jaotused sarnased
  - (suhteliselt uus teadmine: Eesti ümbruse jaoks märgatud 2001-2003)
- Põhja-Euroopa tingimustes: Weibulli jaotuse kuju parameeter  $k \sim 2$

Soomere, Keevallik, Proc. Estonian Acad. Sci. Engineering, 2003

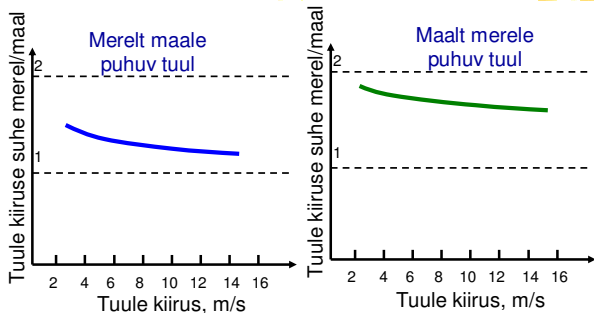
Keevallik, TTÜ Aastaraamat 2007

Keevallik, Soomere, Estonian Journal of Engineering 2008

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Tuul maal ja merel Soome lahe moodi



Paumänen ja Laurila, Geophysics, 1982; Kalbadagbrund/Loviisa

## Tuul maal ja merel ameerika moodi

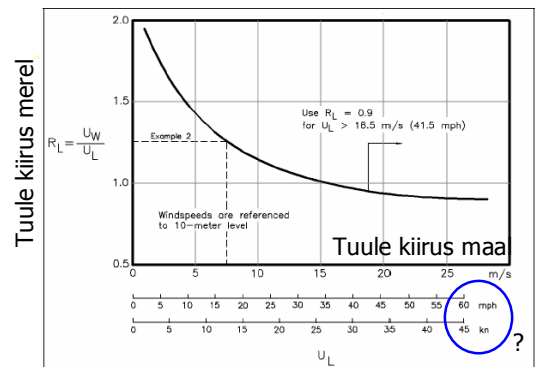


Figure II-2.7. Ratio  $R_L$  of wind speed over water  $U_W$  to wind speed over land  $U_L$  as a function of wind speed over land  $U_L$ , (after Resio and Vincent (1977))

## Merel ja rannal puhuvad tuuled

Merelt maale puhuv tuul:

- nõrgad ja mõõdukad tuuled merel üldiselt tugevamad kui rannal

- Tugevates tormides võib tuul rannal olla tugevam kui avamerel (väga harva – kui merel on kõrged lained ja maal libe jää)

Maalt merele puhuv tuul:

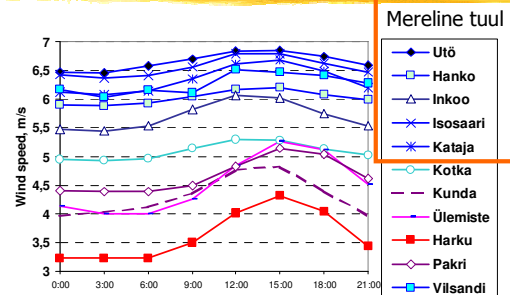
- praktiliselt alati merel tugevneb (v.a. briis)

Tuuled üle 15 m/s: **võivad** olla maal tugevamad kui merel

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

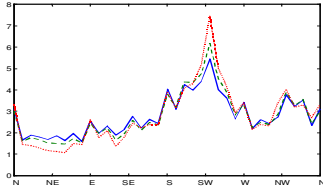
## Tuule keskmise kiiruse muutumine ööpäeva lõikes



Soomere 2010

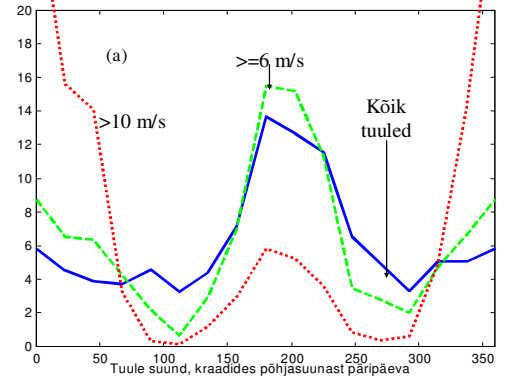
EMH0090 Rannikuprotsessid

### Utö: eri tugevusega tuulte esinemissagedused lähedased



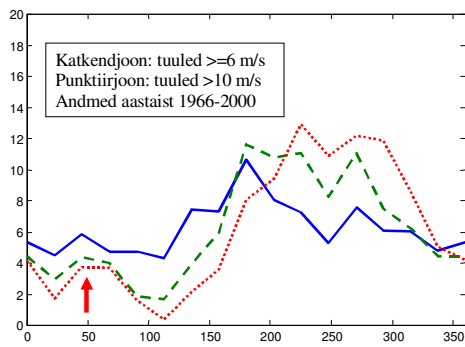
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

### Kunda 1966-2000: probleem pankrannikuga?



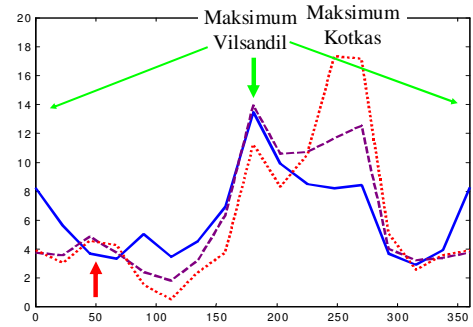
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

### Pakri 1966-2000



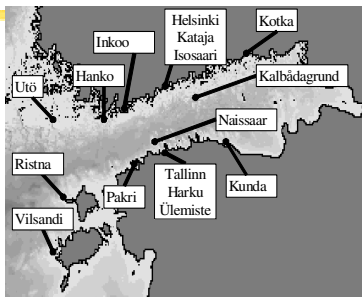
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

### Tallinn (Harku) 1991-2000



Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

### Soome laht: kitsas meri, telg ei ole samasuunaline valitsevate tuultega

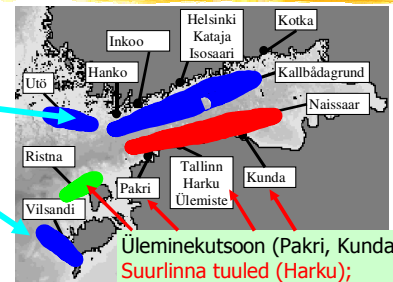


Järelkult tuul merel (kohati) oluliselt mõjutatud majsmaa poolt

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

### Soome lahe meteoandmed

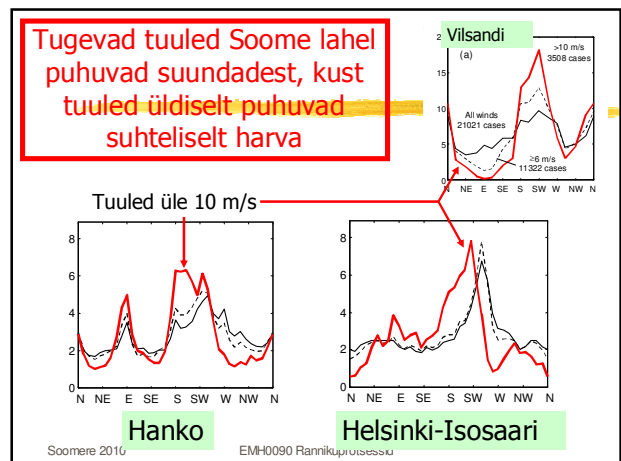
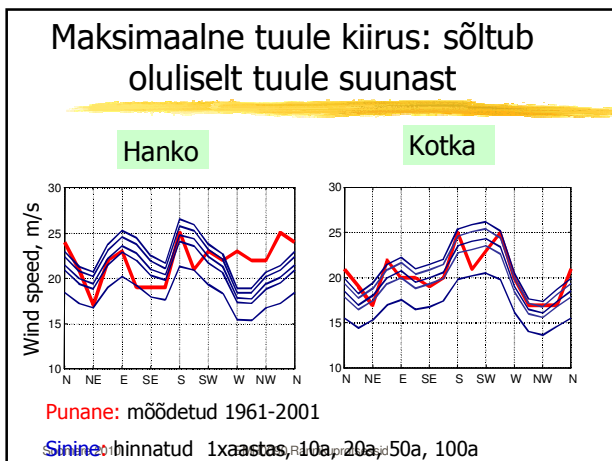
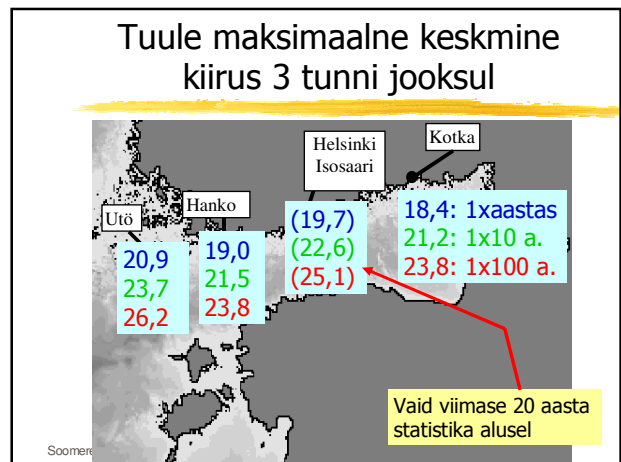
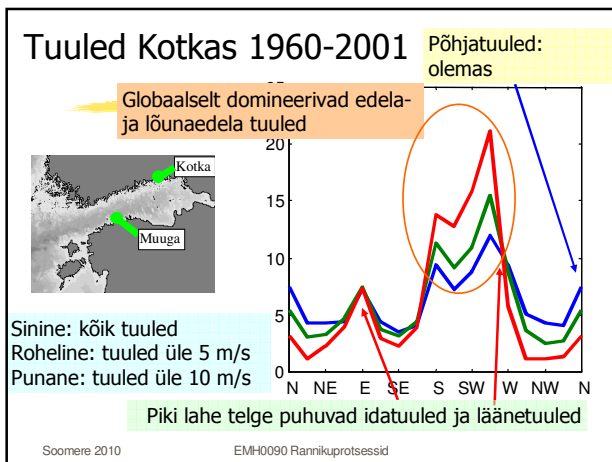
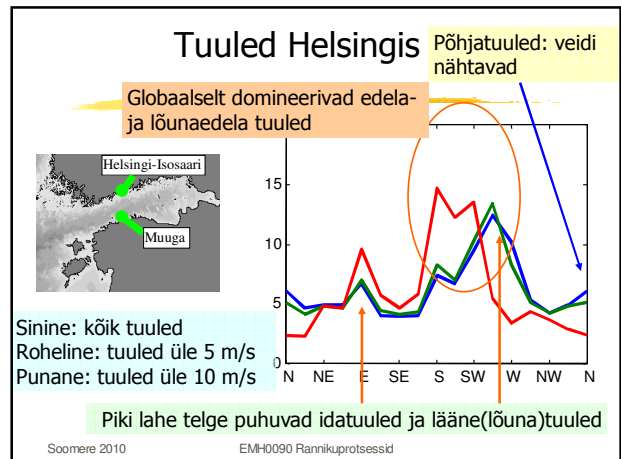
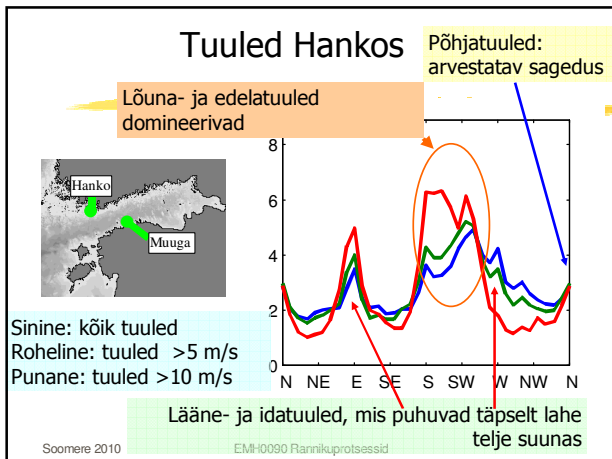
Adekvatselt iseloomustavad meretuult: Soome rannik + Utö, Vilsandi



Üleminekutsioon (Pakri, Kunda)  
Suurlinna tuuled (Harku); ebatavaline tuule statistika

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid





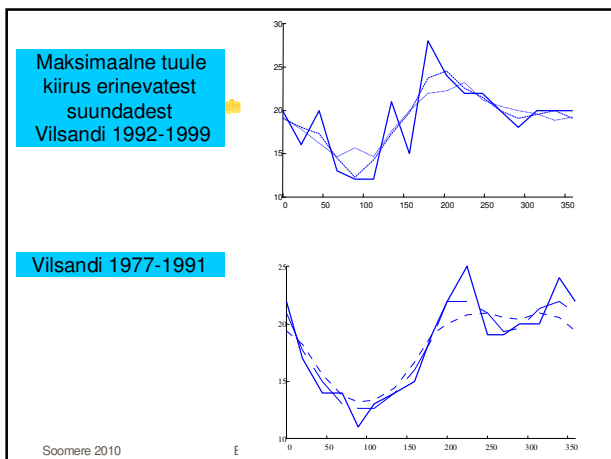
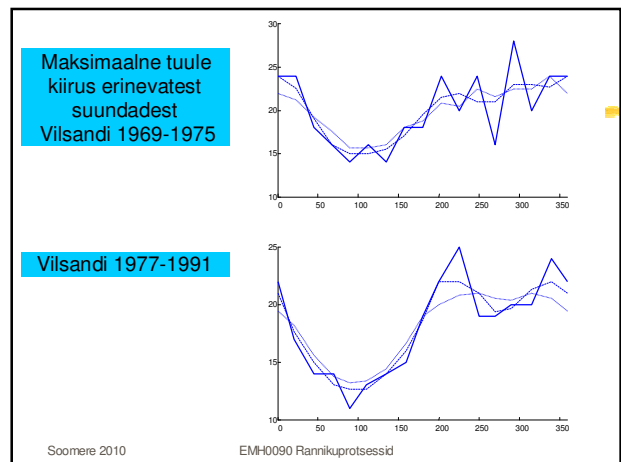
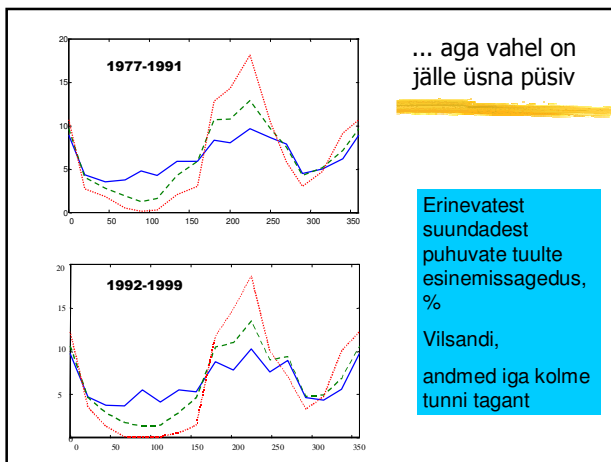
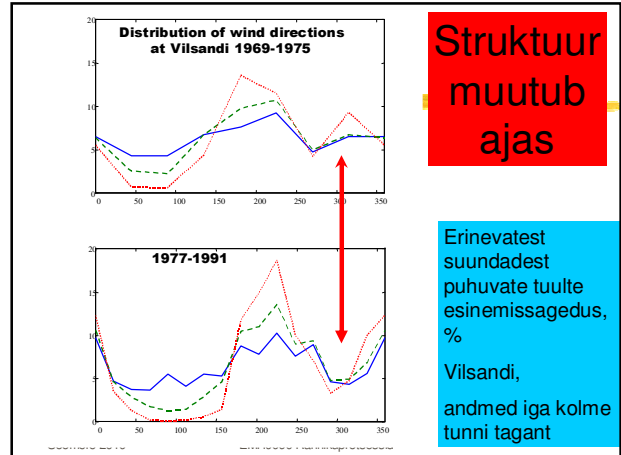


## Tuule struktuur Soome lahel

- Läänemere avaosas valitsevate tuulte (SW+NNW) kombinatsioon
  - piki lahe telge puhuvate tuultega
- Läänemere mõju ~ tugevate NNW tuulte osakaal väheneb ida pool
- Idakirde tuuled võivad olla väga tugevad (kuid praktiliselt olematud Läänemere avaosas)
- Kagutuuled nõrgad ja haruldased – nagu L-merel
- Tugevaimad tuuled puhuvad suundadest, kus tuuled üldiselt pole kõige sagedasemad
  - Võimalik põhjus: maismaa tugev(am) mõju nõrgematele tuultele
- Lõunaranniku mõõtmised ebaadekvaatsed, põhjarannikul OK ("tänu" valitsevale tuule suunale)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid



## Tuule struktuuri rakendus: lainetuse kujunemine

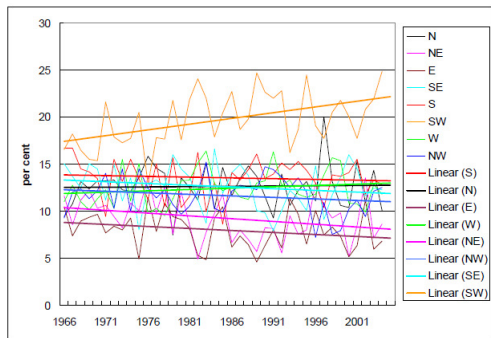
- Lainetust kujundavad
- Tuul
  - tuule kiirus ja suund + nende muutlikkus
  - tuule kestvus
- Rannajoon ning selle mõju tuulele
- Põhja topograafia
- Hoovused ning veeseis
- .....

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

## Muutuv tuul

Jaak Jaagus 2009. Pikaajalised muutused tuule suundade korduvuses Eesti läänerannikul.

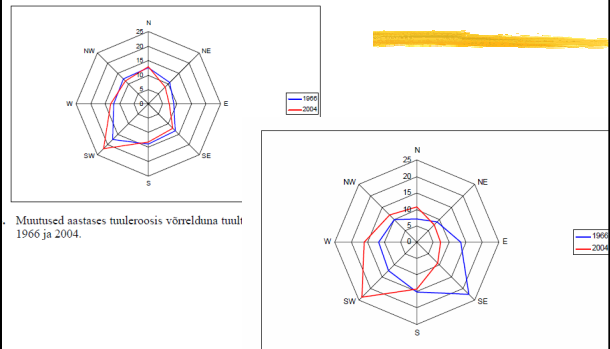


Joonis 3. Tuule suundade korduvuse aegred ja lineaarsed trendid Vilsandi aja- vahemikul 1966–2005.

Soo

## Muutuv tuul II

Jaak Jaagus 2009. Pikaajalised muutused tuule suundade korduvuses Eesti läänerannikul.



Muutused aastases tuuleriisits võrrelduna tuule 1966 ja 2004.

Joonis 8. Muutused talve tuuleriisits võrrelduna tuuleriisitsi trendi järgi aastail 1966 ja 2004.

Soomere 2010

## Saaremaa süvasadam: avatud mere suunas

Vaigu: suhteliselt varjatud

Suuriku-Kuriku: mõnevõrra avatud

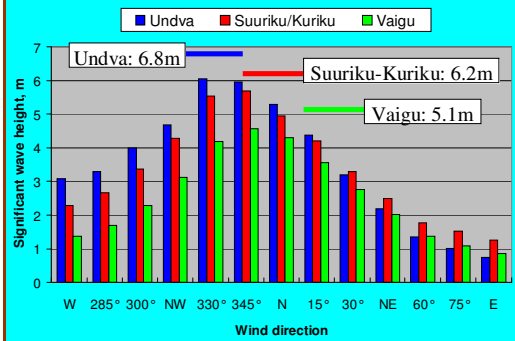
Undva: enim avatud



Soomere 2010

EMH-0090 Rannikuprotsessid

## Maksimaalne lainekõrgus sadamakohtades erinevatest suundadest puhuvate tuulte korral üks kord kümne aasta jooksul



## Valik järeltusi

Traditsiooniline vaatekoht:

- Läänemere tuule struktuur suundade järgi on enam-vähem isotroopne, mõõduka SW ülekaaluga

Tegelikult

- tuule struktuur tugevalt anisotroopne; eriti ebaühtlane on maksimaalse tuule kiiruse jaotus ilmakaarte järgi
- Domineerivad edela- **JA** NNW tuuled; kirdetuuled on haruldased

Läänemere avaosas, Riia lahes ja Soome lahes on erinevad tuule struktuurid!!!

Soomere 2010

EMH-0090 Rannikuprotsessid

## Valik järeltusi II

- Läänemere keskmine veetase on tuule struktuuri funktsioon ja muutub ajas koos tuule struktuuriga
- Lainekliima avamerel on ebaühtlane: Eesti rannavetes esinevad sageli üle 5 meetri kõrgused lained; Rootsi rannavetes on juba 2-3 meetri kõrgused lained haruldased
- Maksimaalse lainekõrguse jaotus erinevate rannaosades on tugevalt ebaühtlane
- Teatavatest suundadest (Läänemere avaosas põhjapoolses sektoris - kirdest) ei puhu tugevad tuuled praktiliselt mitte kunagi - nendes suundades pole vaja ehitada lainemurdjaid
- Teatavates rannaosades on loodusliku lainetuse intensiivsus väike; nendes piirkondades võib intensiivne tehnogeneenne lainekoormus rikkuda looduslikku tasakaalu

Soomere 2010

EMH-0090 Rannikuprotsessid