

Kliimamuutuste põnev muster: Meri muutuste puhvri ja indikaatorina

Tarmo Soomere

TTÜ Küberneetika Instituut
Lainetuse dünaamika labor
Mittelineaarsete Protsesside Analüüsi Keskus

Sissejuhatuse asemel



Ilm ja kliima:
sama mündi kaks eri külge



Ilm võib olla hea, halb, kuri,
päikeseline, pilvine, tuuline, vihmane ...



Ilm realiseerub praegu & siin

http://ilmajaam.postimees.ee/

File Edit View Favourites Tools Help

Swedbank - Konto väljavõte ML

 KOLMAPÄEV	 -2..3°	 -12..-4°
Öösel: Muutliku pilvisusega olulise sajuta ilm. Puhub lõuna- ja kagutuul 2-7 m/s. Õhutemperatuur on -4..-10, kohati -12°C. Päeval: Muutliku pilvisusega ilm. Kohati võib sadada vähest lörtsi. Puhub lõuna- ja kagutuul 2-7 m/s. Õhutemperatuur on -2..+3°C.		
 NELJAPÄEV	 1..5°	 -12..-2°
 REEDE	 1..5°	 -10..0°

Allikas: EMHI

Postimees, 22.03.2016

Windows taskbar: 12:17 22.03.2016

Wikipedia sõnastusi

- Ilm on pidevalt muutuv atmosfääri (õhkkonna) olek mingis paigas mingil ajal.
 - Ilma kujundavad elemendid on õhutemperatuur, õhurõhk, õhuniiskus, sademed, tuul ja atmosfäärinähtused (äike, tuisk, udu, pilvisus jne).
 - Ilma iseloomustavad konkreetsed numbrid:
 - näiteks temperatuur $T(x,y,z,t)$, tuule kiirus $V(x,y,z,t)$
- Nalja kah:
 - Ilmaennustamine on teaduse rakendus, mille abil püütakse ennustada atmosfääri seisundit tulevas ajas mingis kohas

Kliima on matemaatiline kategooria

==Ilma iseloomustavate parameetrite statistilised omadused

- Keskmised, standardhälbed, kvantiilid, ekstreemväärtused
- Tõenäosusjaotused ja nende parameetrid
- Ruumilised mustrid

Kliima muutumine == mistahes nimetatud parameetri lühiajalised trendid, dünaamilise/sesoonse käigu muutumine, ekstreemsituatsioonide harvenemine/sagenemine, pikaajaline muutlikkus jne.

Kitsa laia matemaatika seosest ilma-
ja kliimauuringutega:

Eesti keeles:

- „Ilm“ Wikipedias: ca 7 lk (12pt, Word), 40 viidet
- „Kliima“ Wikipedias: 0,5 lk, 1 viide 1948.a. ilmunud artiklile

Inglise keeles:

- „Weather“ Wikipedias: ca 11 lk, 67 viidet
- „Climate“ Wikipedias: 14 lk, 56 viidet

Kliima kui kategooria tähendus muutub

- Kauge minevik (kuni ca 19. sajandi I pooleni): puhtalt inimesekeskne vaatekoht
 - Kliima kui tingimuste kompleks inimese eluks, ühiskonna ja tsivilisatsiooni eksisteerimiseks
- Kliimateaduse kujunemine (ca 1850-1900)
 - Kliima kui ilmanähtuste statistika
 - Neutraalne, ühiskonnaväline süsteem
- Kaasaeg
 - Nii looduse kui ka inimeste poolt mõjutatav süsteem
 - Kliimamuutus: poliitilise võitluse areen

Nico Stehr, Hans von Storch 2010. Climate and Society. World Scientific.

Esimene osa



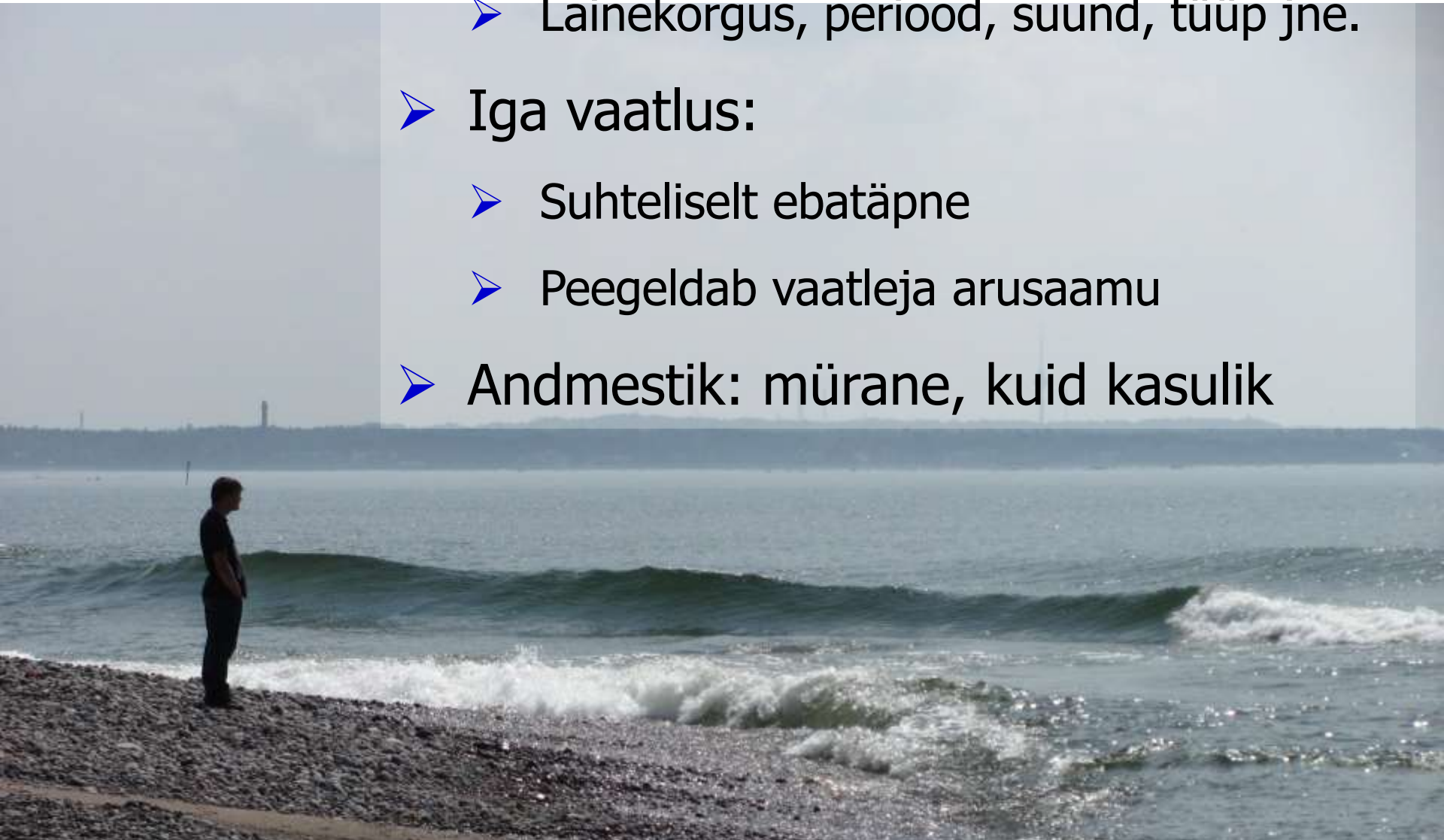
Vaatamisest märkamiseni

Vajalikke uusvanu mõtteid I

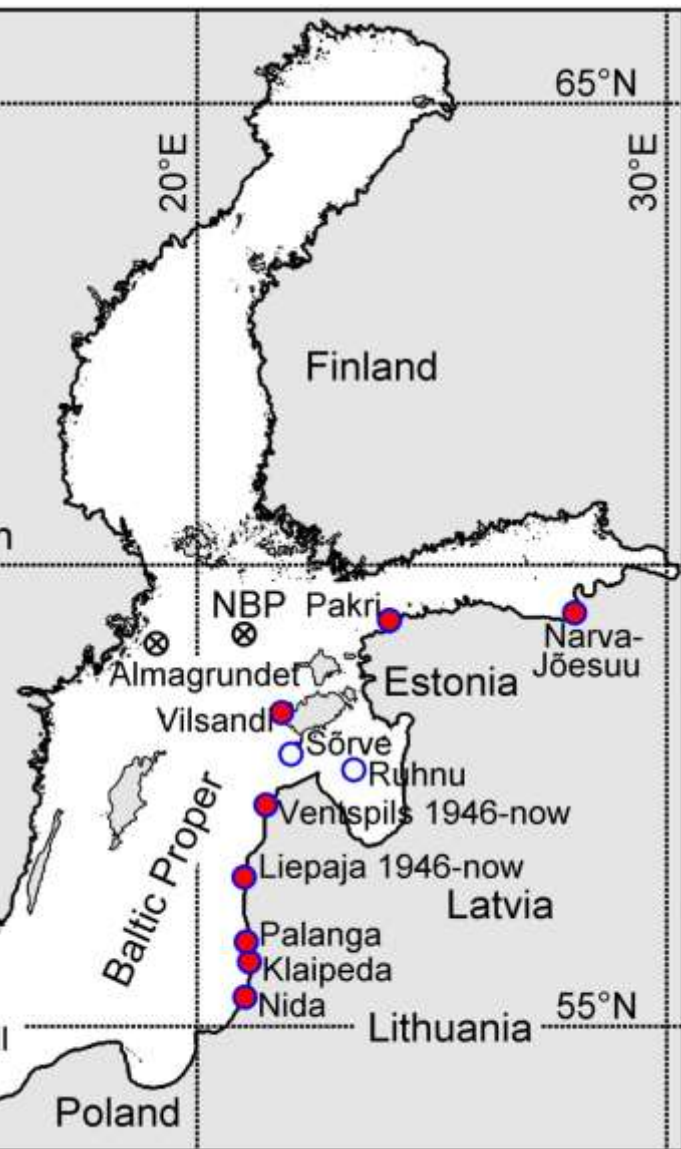
- Nii palju on võimalik näha lihtsalt [õigesti] vaadates
 - Ükski parameeter pole tähtsusetu
- Kes minevikku ei mäleta, see elab tulevikuta
 - 30 aastat on sageli liiga lühike aeg
- Asjad pole mitte lihtsalt keerukamad kui me arvame, vaid keerukamad kui me arvate oskame
 - Juhtub, et keskmise (lainekõrguse) vähenemisega kaasneb ekstreemsete lainekõrguste kasv

Visuaalsed lainevaatlused:

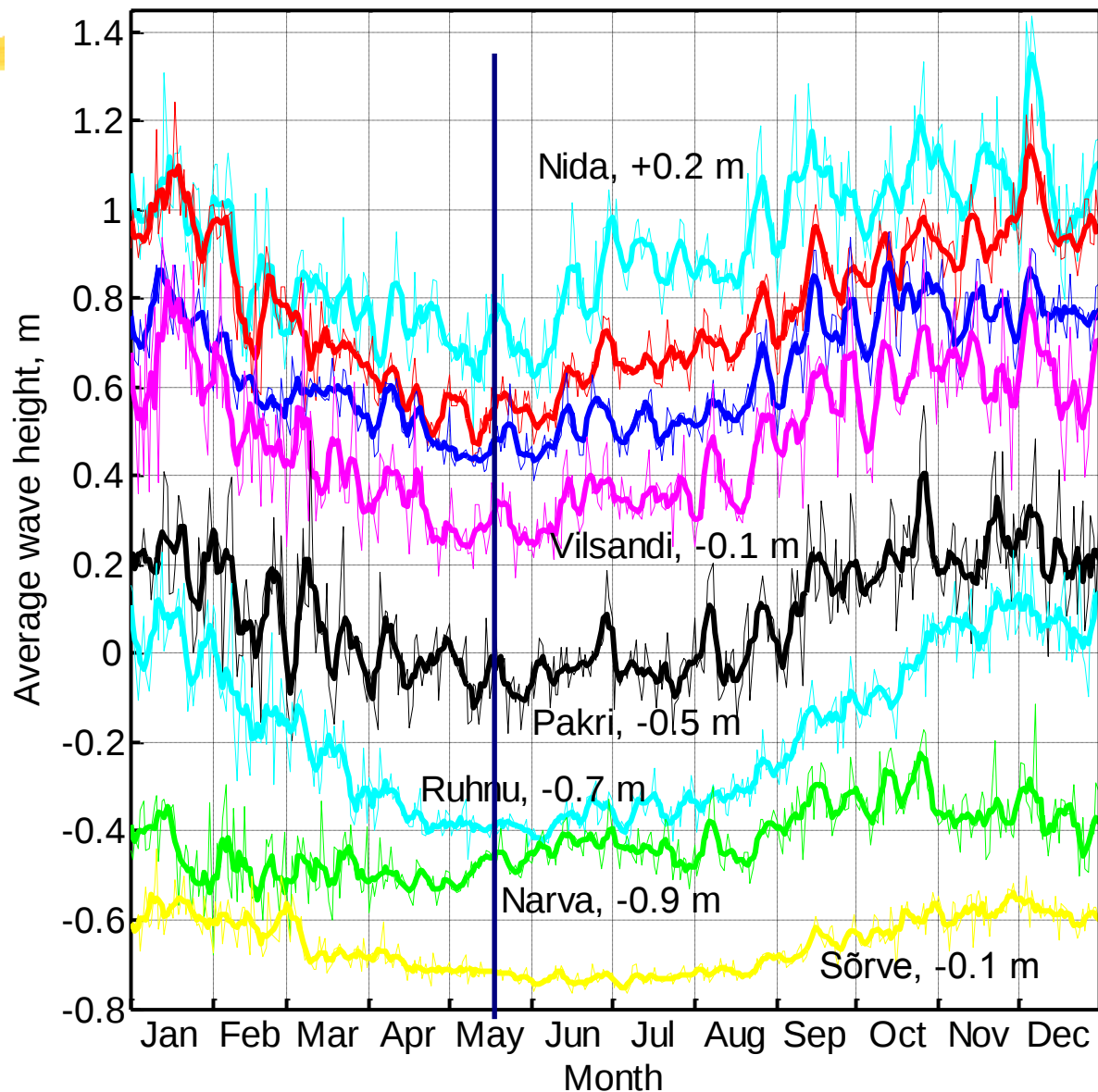
- Lihtsalt vaadates (vahel binokliga)
 - Lainekõrgus, periood, suund, tüüp jne.
- Iga vaatlus:
 - Suhteliselt ebatäpne
 - Peegeldab vaatleja arusaamu
- Andmestik: mürane, kuid kasulik



Visuaalsed vaatlused: võti: lõks või aare?



Lainekõrgus üksikute kalendripäevade
jaoks: kooskõlas Nidast Narvani



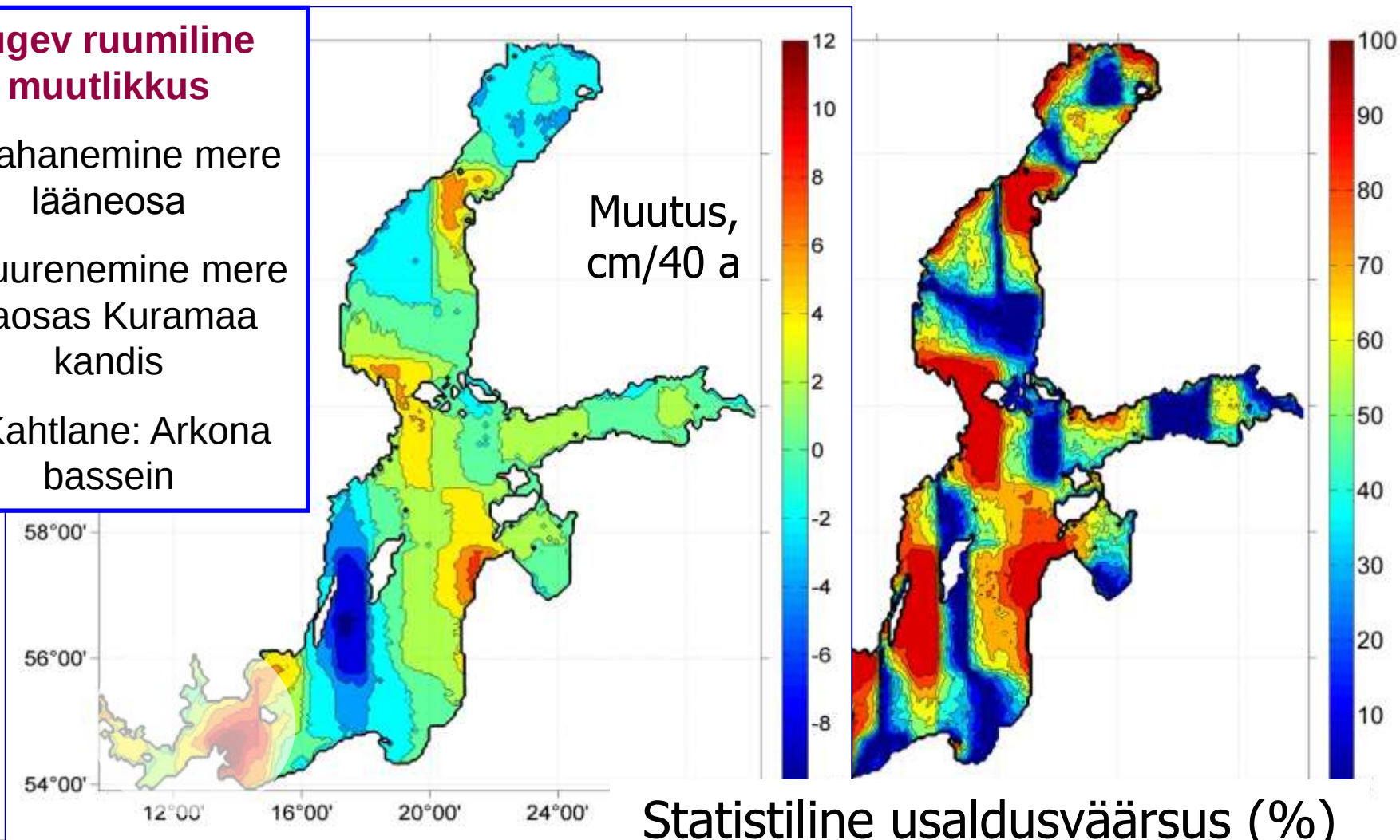
Vajalikke uusvanu mõtteid II

- Nii palju on võimalik näha lihtsalt [õigesti] vaadates
 - Ükski parameeter pole tähtsusetu
- Kes minevikku ei mäleta, see elab tulevikuta
 - 30 aastat on sageli liiga lühike aeg
- Asjad pole mitte lihtsalt keerukamad kui me arvame, vaid keerukamad kui me arvate oskame
 - Juhtub, et keskmise (lainekõrguse) vähenemisega kaasneb ekstreemsete lainekõrguste kasv

Rehkendatud lainekõrguse muutused 1970-2007: väga imelik muster

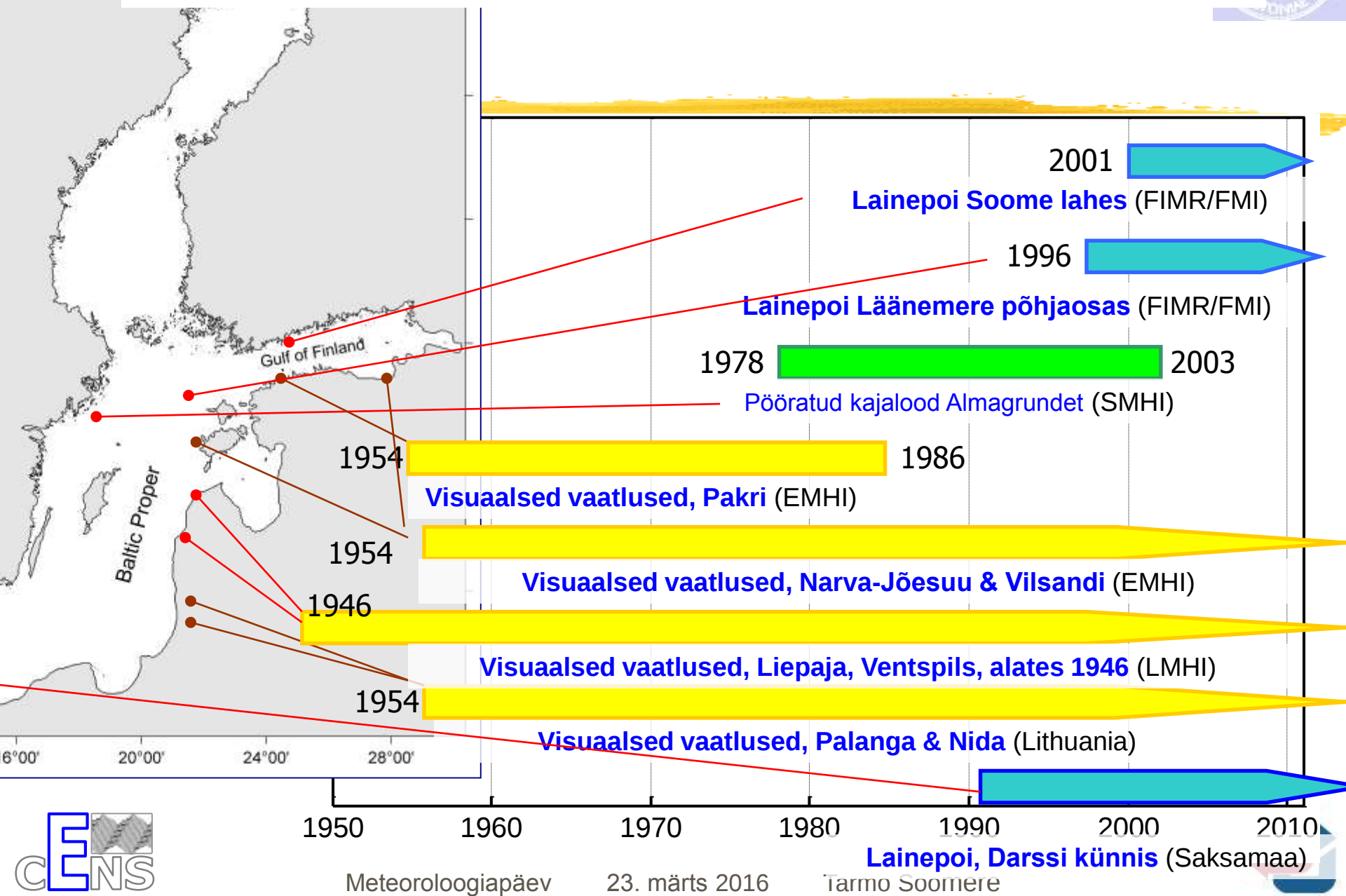
Tugev ruumiline muutlikkus

- Kahanemine mere lääneosa
- Suurenemine mere idaosas Kuramaa kandis
- Kahtlane: Arkona bassein





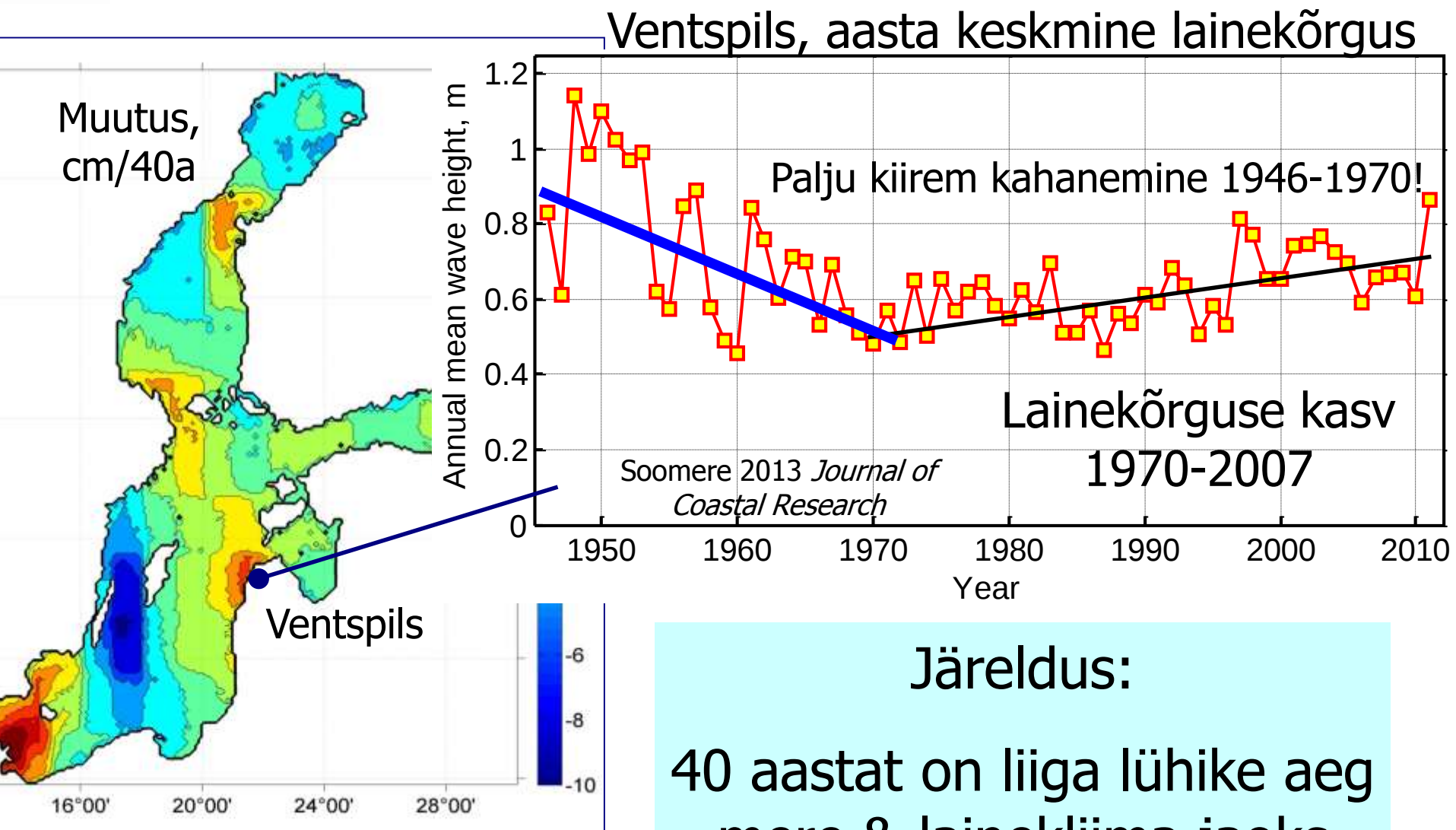
Visuaalsed vaatlused: lõks või aare?





TTÜ 1918

Lainekõrguse muutused: ootamatu muster

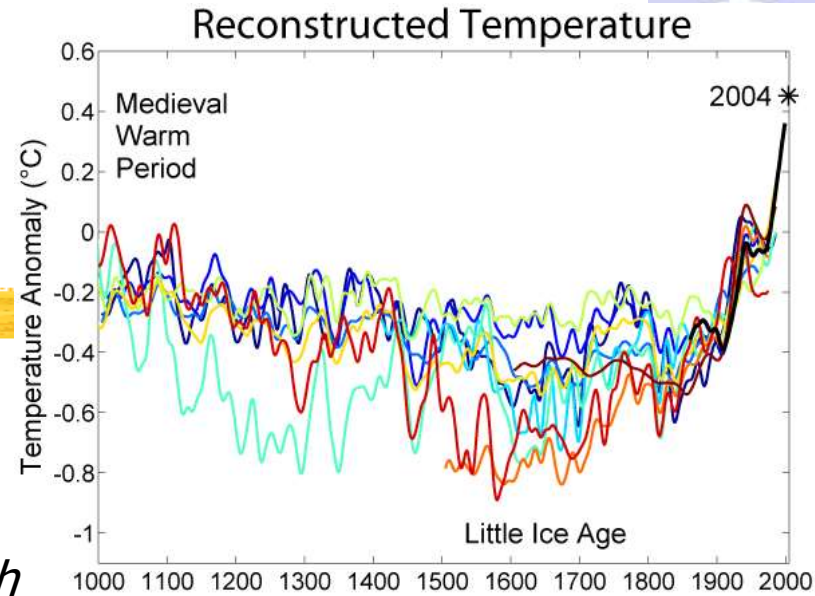


Järeldus:

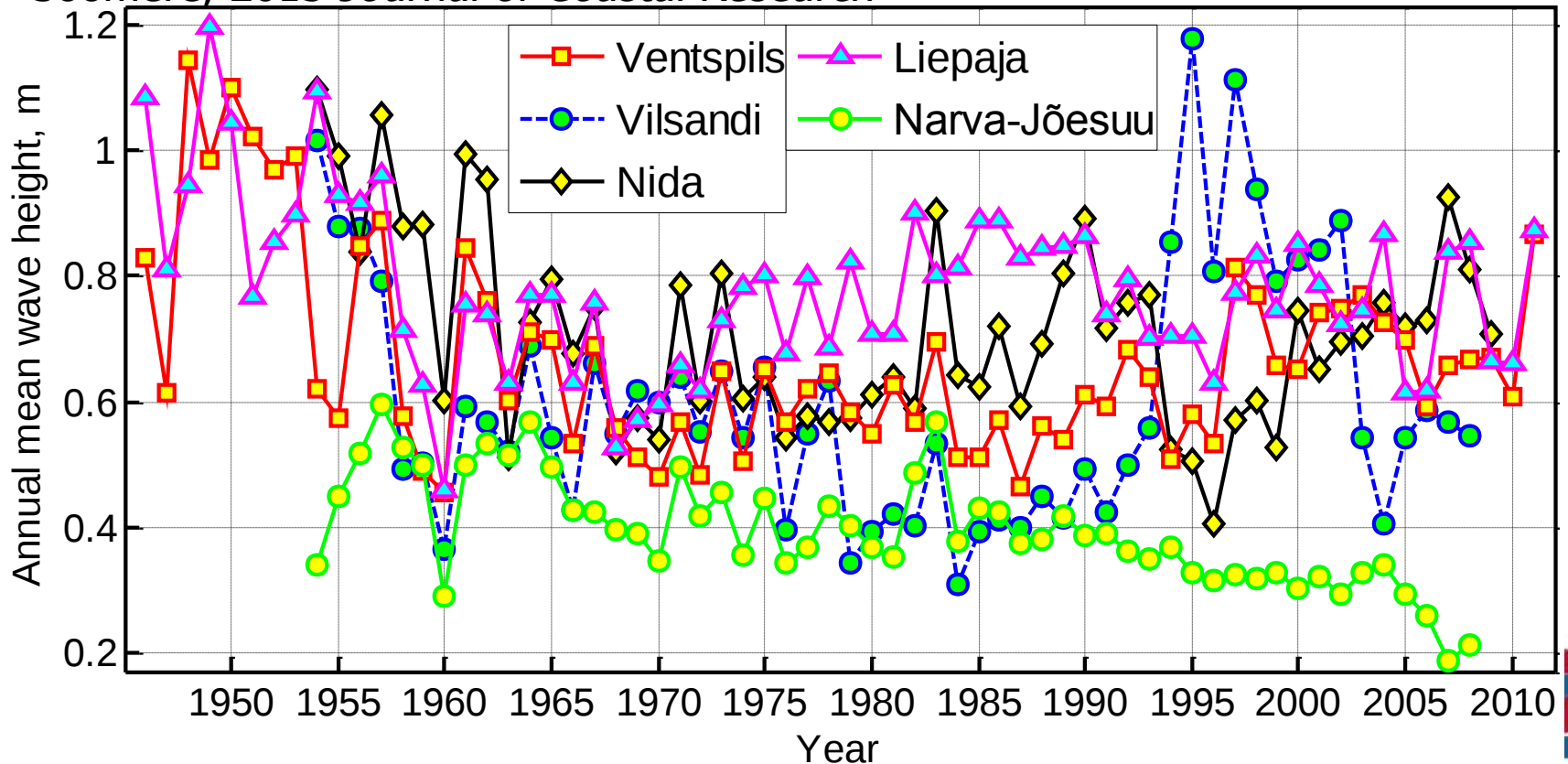
40 aastat on liiga lühike aeg
mere & lainekliima jaoks



Üldpilt Läänemerele: tagurpidi „hokikepp“



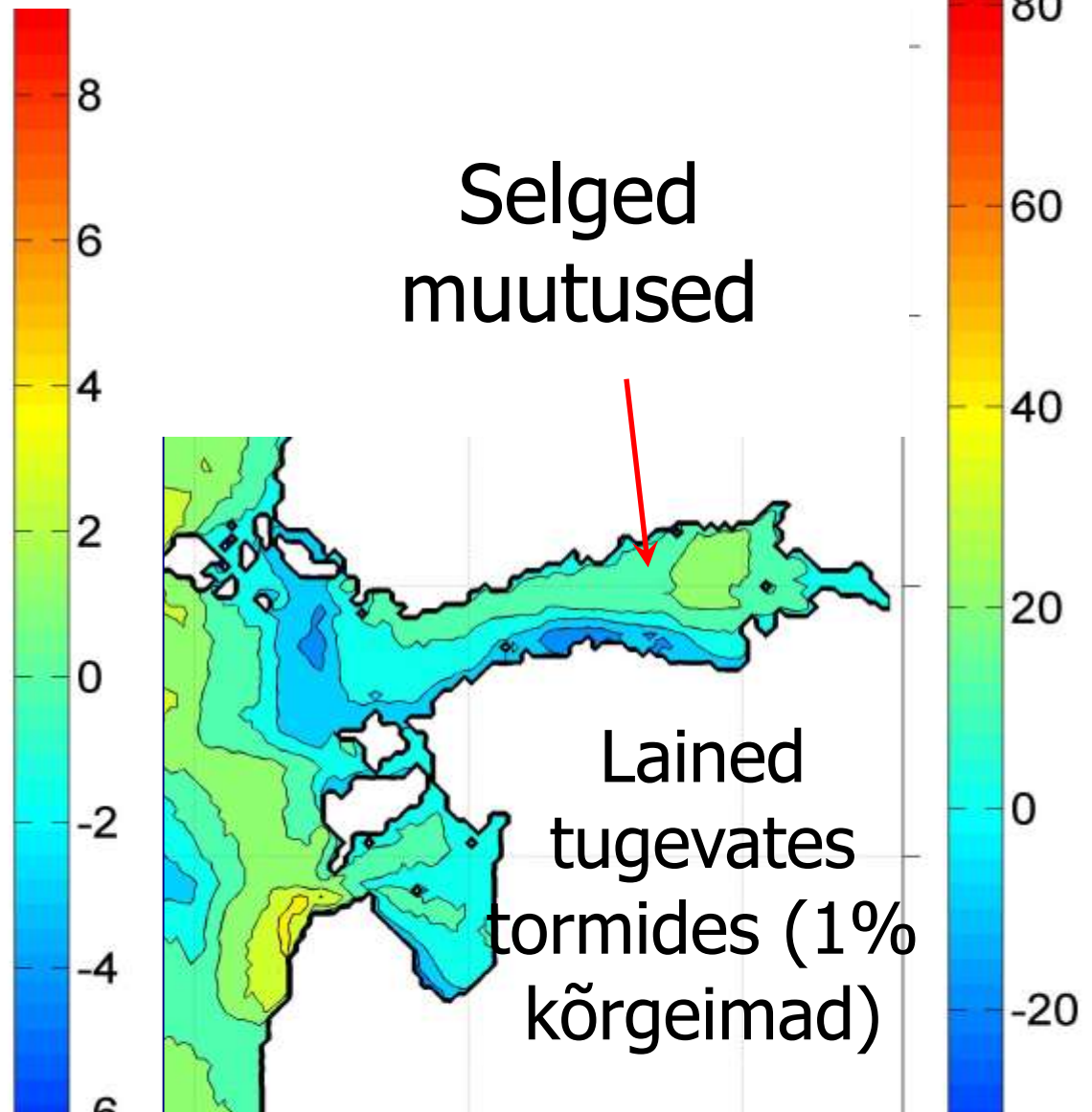
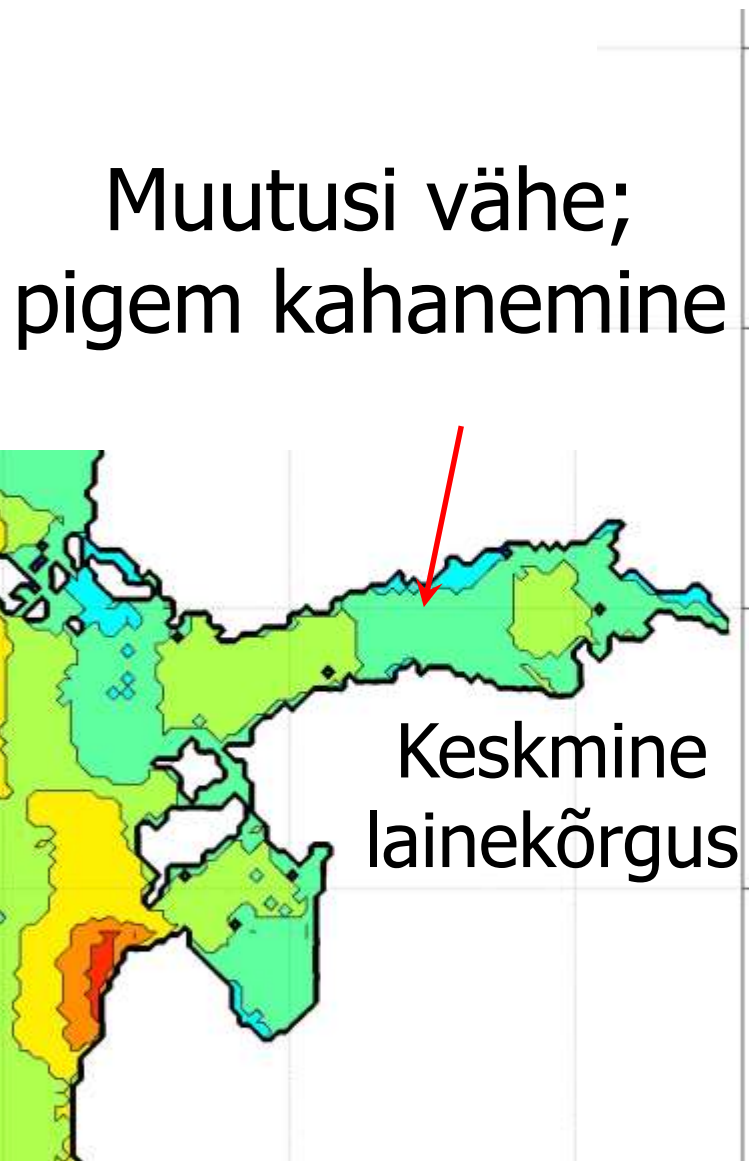
Soomere, 2013 *Journal of Coastal Research*



Vajalikke uusvanu mõtteid III

- Nii palju on võimalik näha lihtsalt [õigesti] vaadates
 - Ükski parameeter pole tähtsusetu
- Kes minevikku ei mäleta, see elab tulevikuta
 - 30 aastat on sageli liiga lühike aeg
- Asjad pole mitte lihtsalt keerukamad kui me arvame, vaid keerukamad kui me arvate oskame
 - Juhtub, et keskmise (lainekõrguse) vähenemisega kaasneb ekstreemsete lainekõrguste kasv

Muutused keskmistes ja ekstreemsustes: selgelt erinevad



Teine osa



Muutused nii suures pildis kui ka detailides:
nähtavad siis, kui õigesti vaadata

Põhja-Euroopa
on soe tänu
Atlandi ookeani
tormidele

Eesti on tormide
teel -- ja tormid
tõstavad laineid
ning määravad
meie ilma

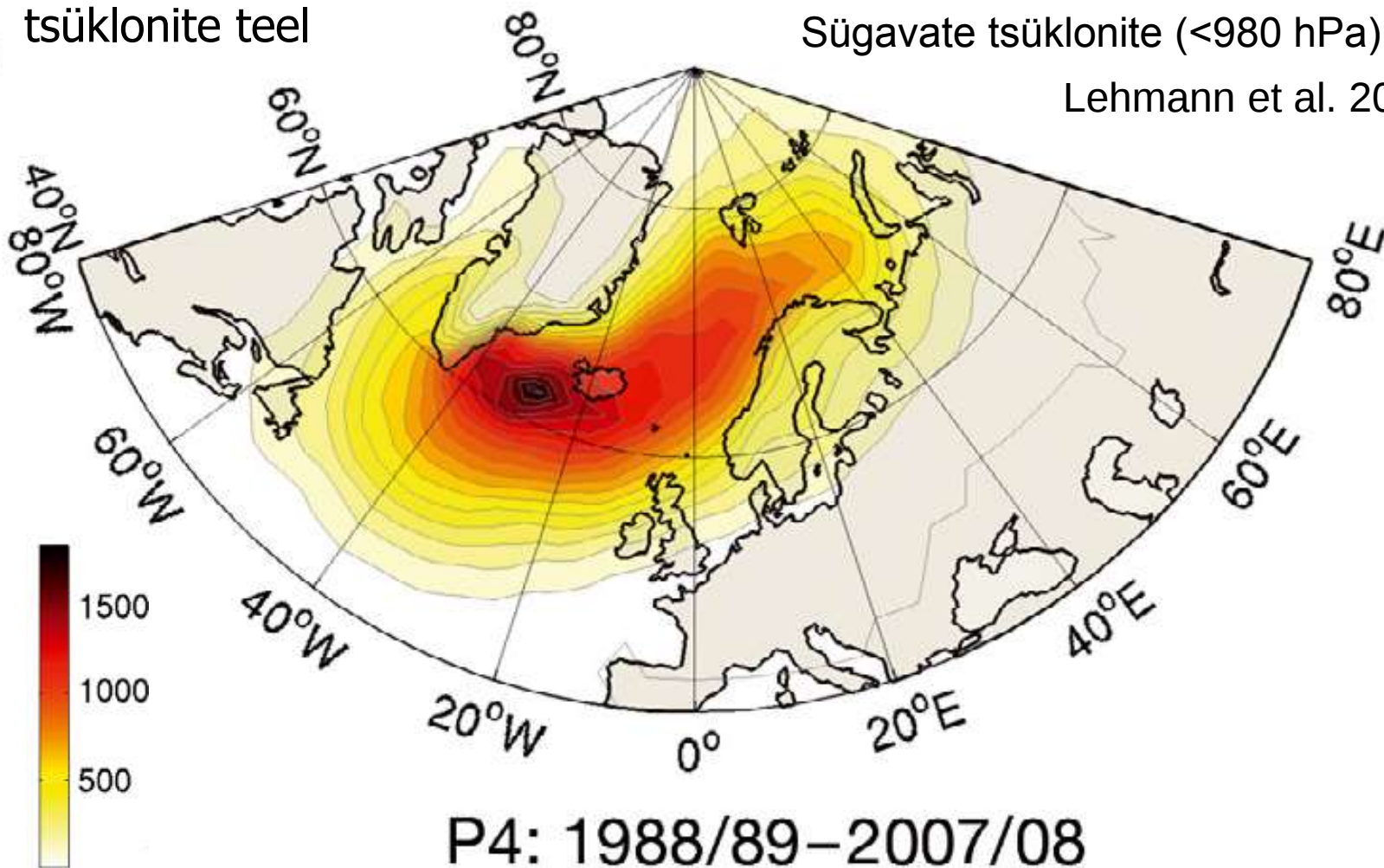


Elu meie laiuskraadidel: mõistliku kliima too(da)vad tsüklonid

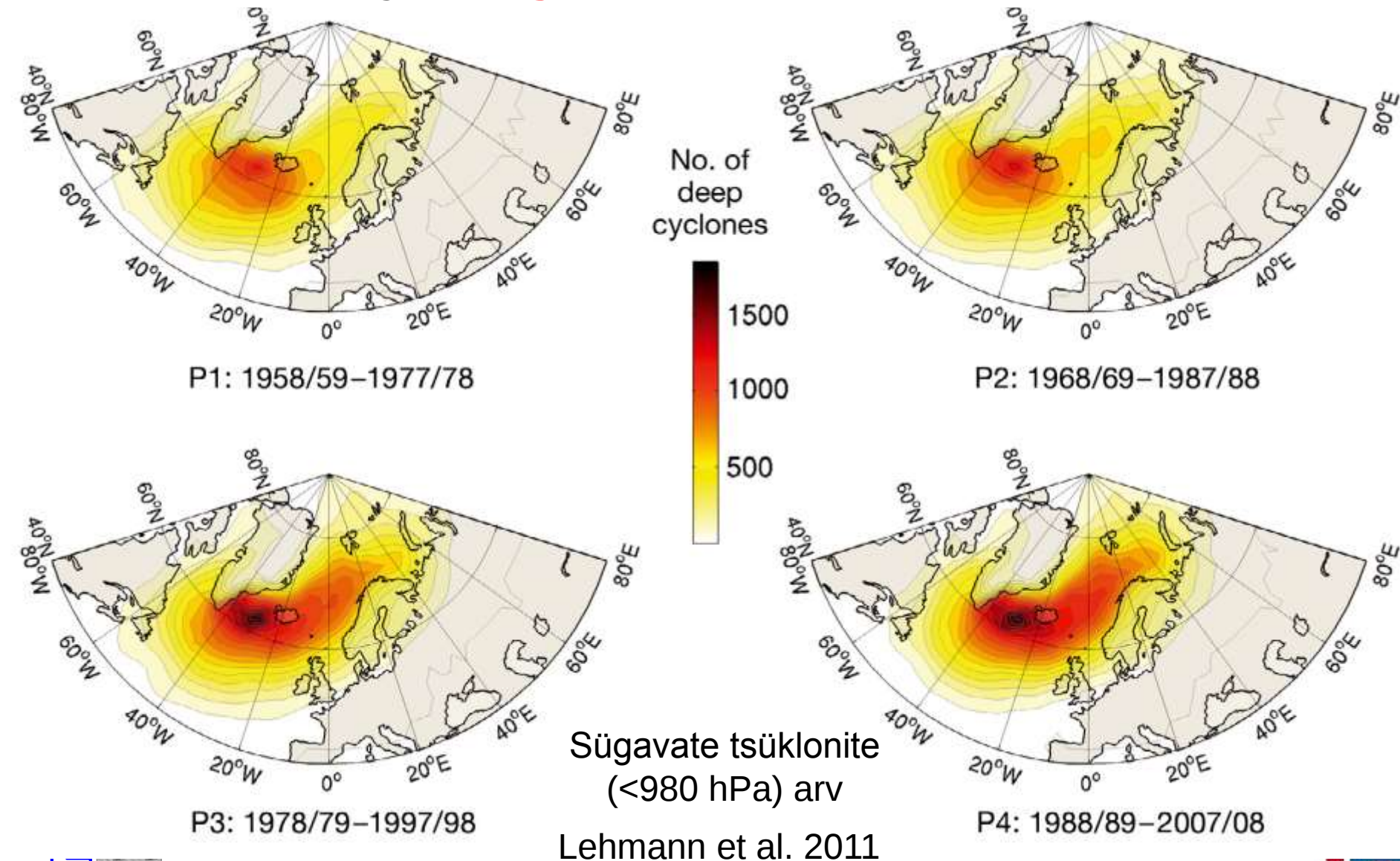
Läänemeri on
tsüklonite teel

Sügavate tsüklonite (<980 hPa) arv

Lehmann et al. 2011



Tsüklonite „perekonnapiilt“ muutub: nüüd on neid **rohkem** ja **mujal** kui 50 aasta eest

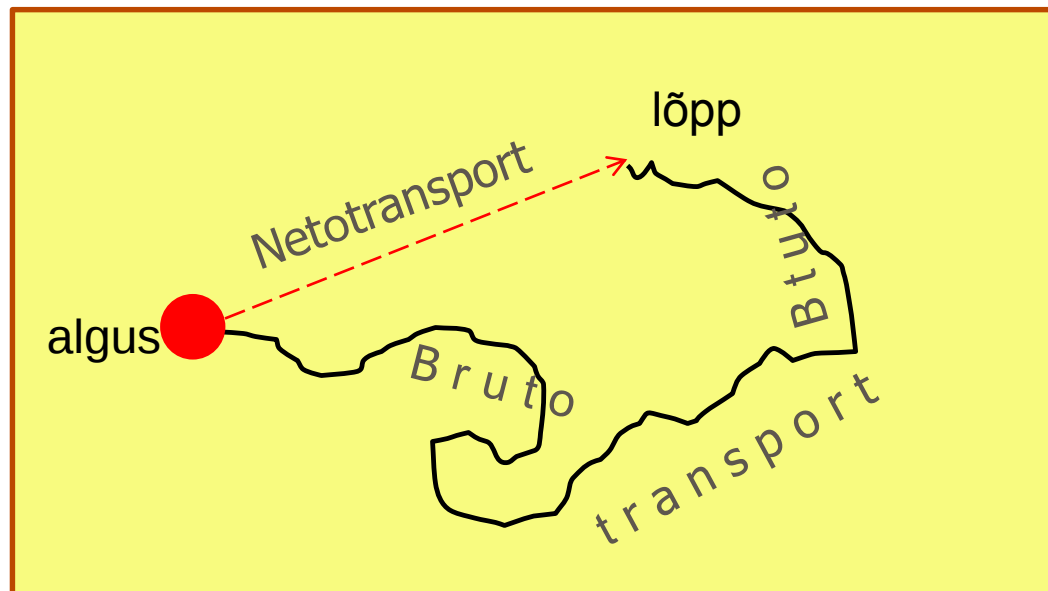


Lihtsad järeldused:

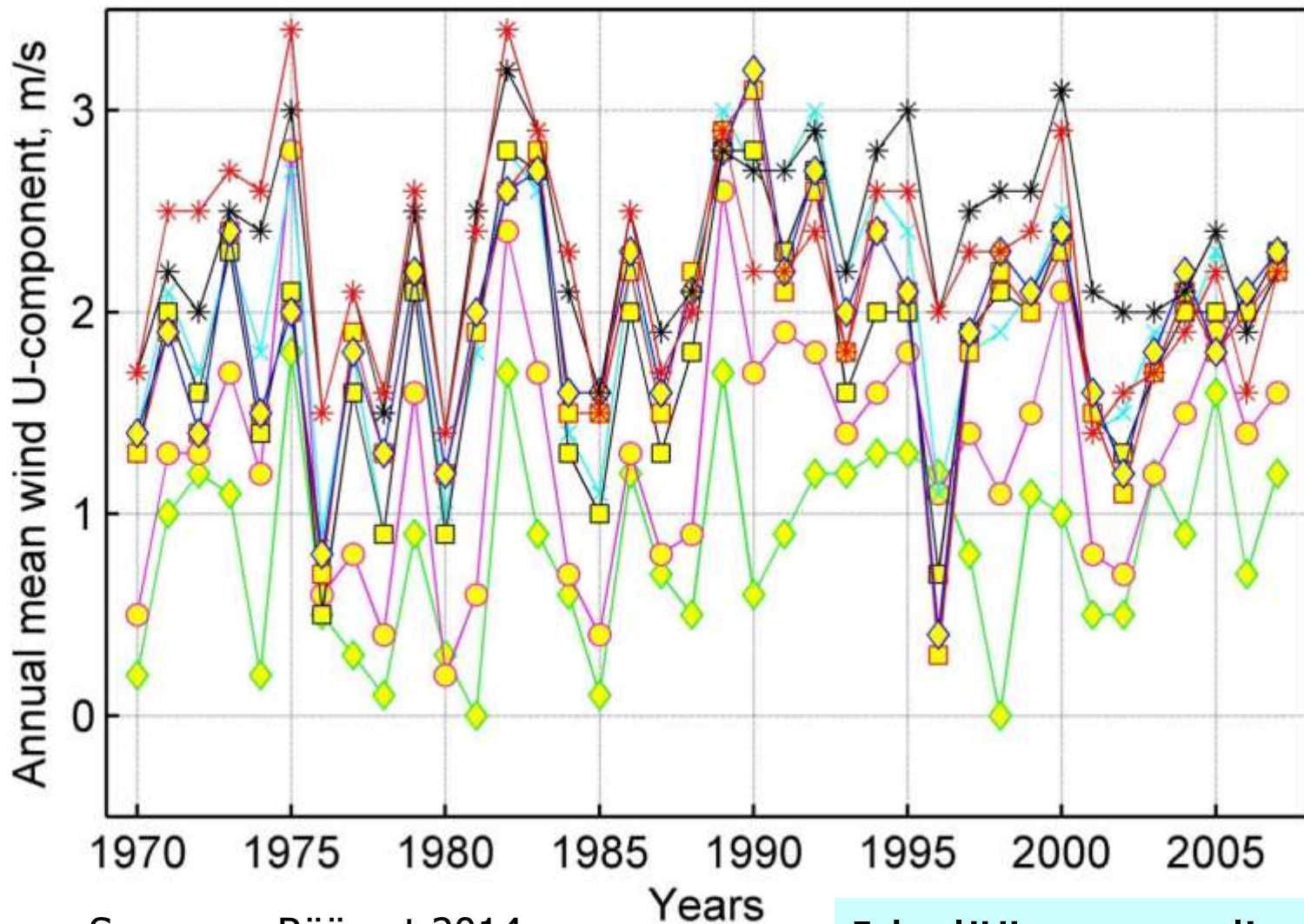
1. Tormid Eestis on nüüd teistsugused kui 20-30 aasta eest:
2. Mitte tugevamad
3. Pigem paiknevad/liiguvad teisiti
4. [Ekstreemsed veetasemed mõnes kohas muutunud, mõnes mitte]

Õhuvool $\sim$ keskmine netotransport

- Väga stabiilne indikaator
- Integreerib kiiruse JA suuna
- Näitab, kuhu õhk lõpuks liigub
- Tuule kiirus/suund: Euleri vaatekoht
- Õhuvool: Lagrange'i vaatekoht



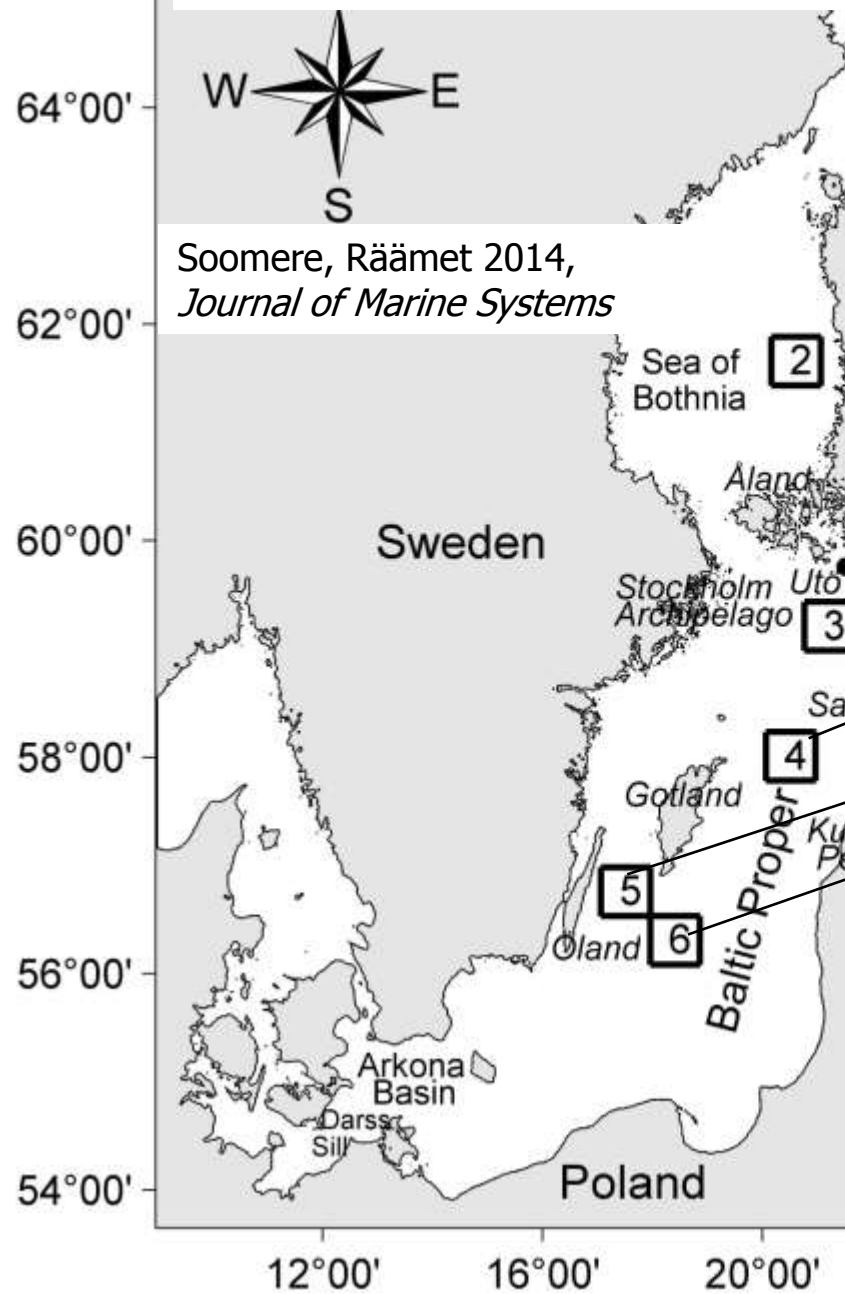
Õhuvoo komponendid Läänemere eri osades



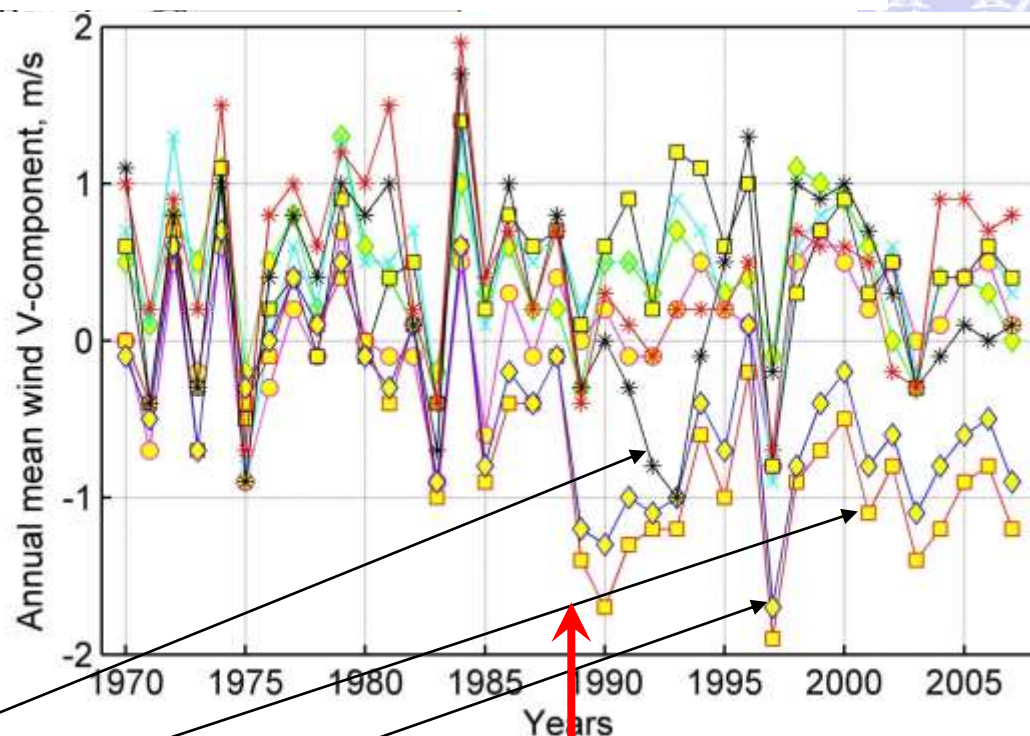
Soomere, Räämet 2014,
Journal of Marine Systems

Ida-läänesuunaline
komponent: muutusteta

Õhuvoo **suuna** radikaalne muutus



Soomere, Räämet 2014,
Journal of Marine Systems



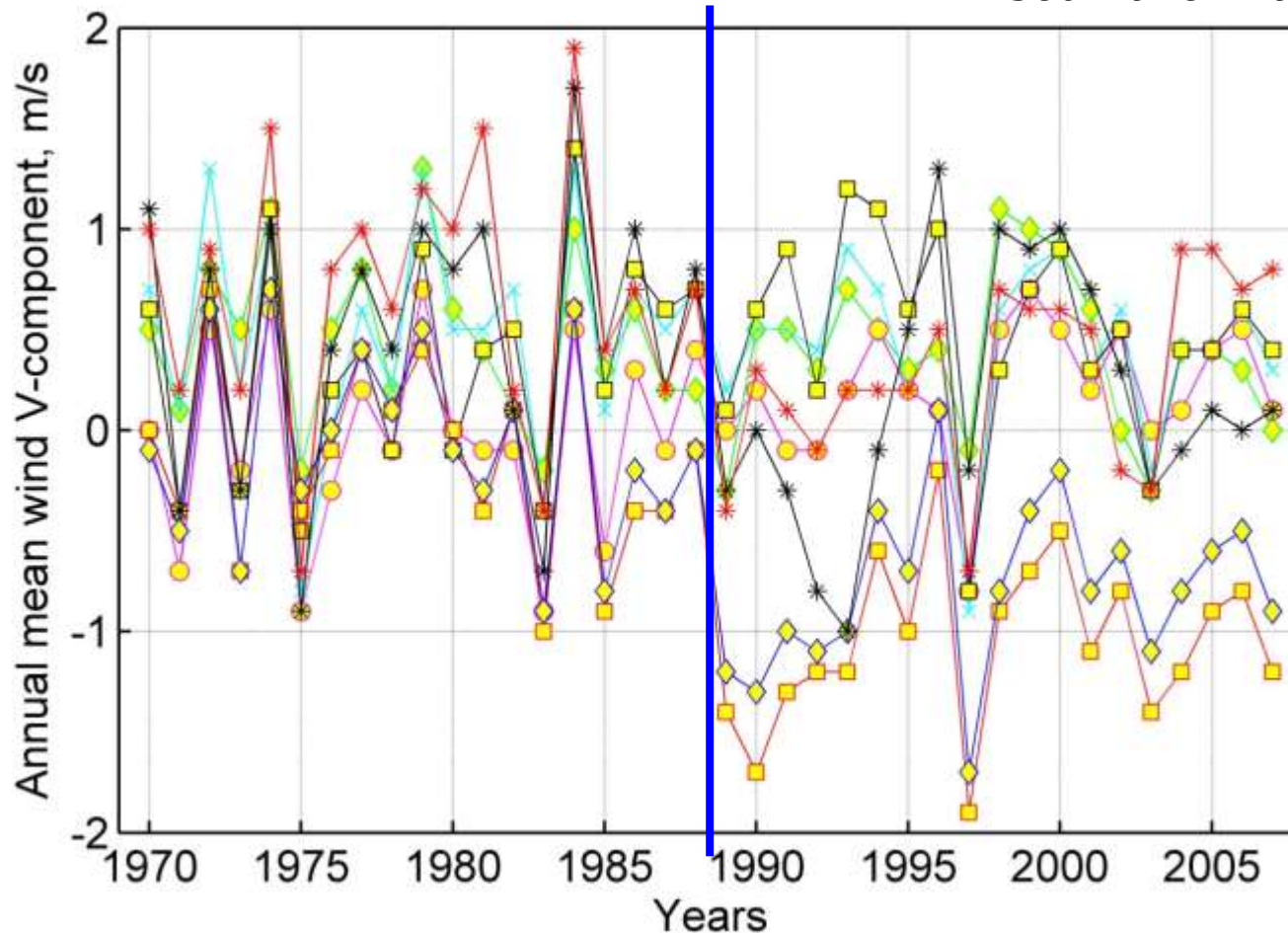
Aasta siis
oli 1988

Õhuvoolu üldsuund: pööre läänest kagusse
merealal Gotlandist lõuna pool
NB! Geostroofiline tuul

Maatuul == madalamad & lühemad lained

De-müstifitseerimine

Soomere, Räämet 2014,
Journal of Marine Systems

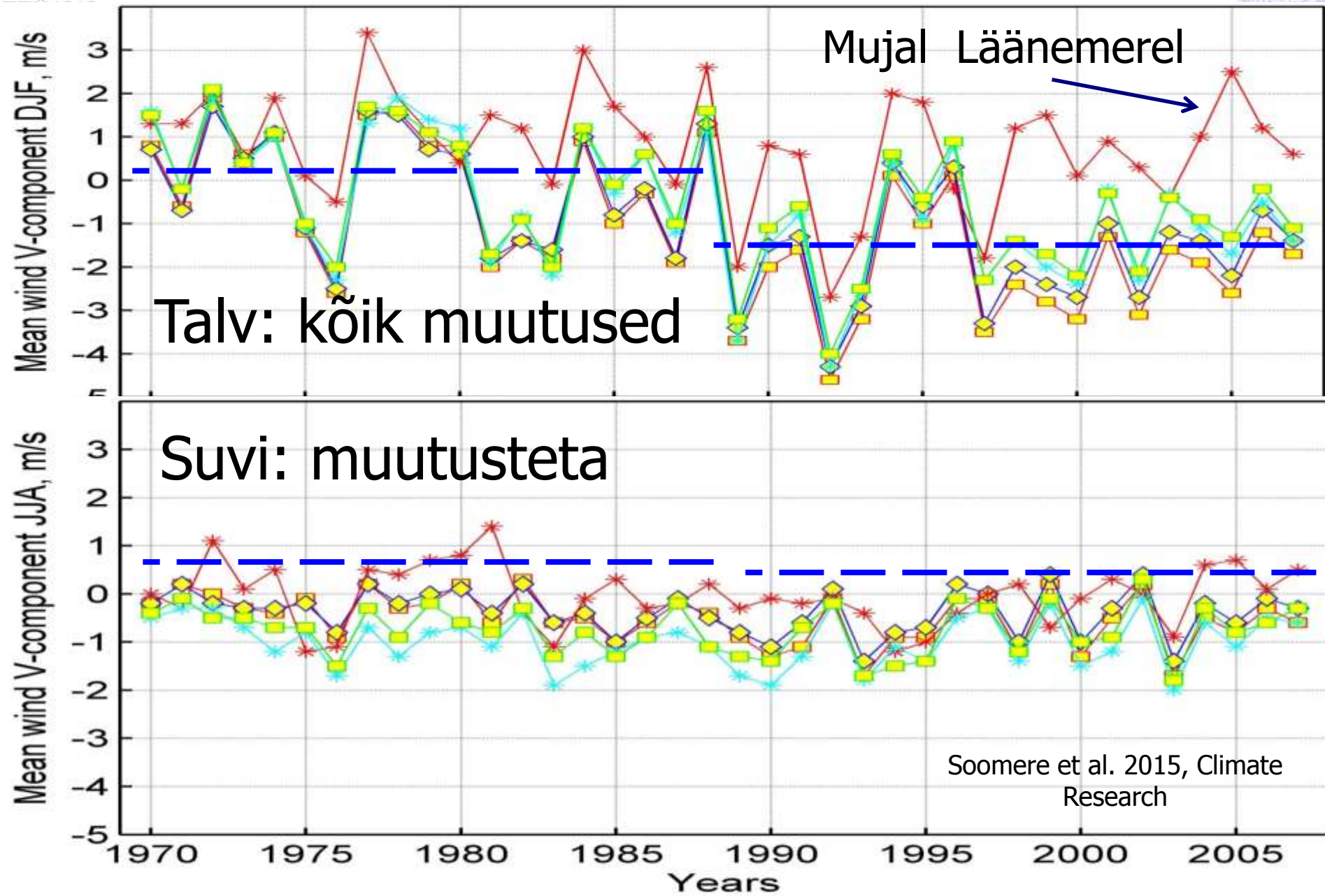


Õhuvoo suuna muutus:

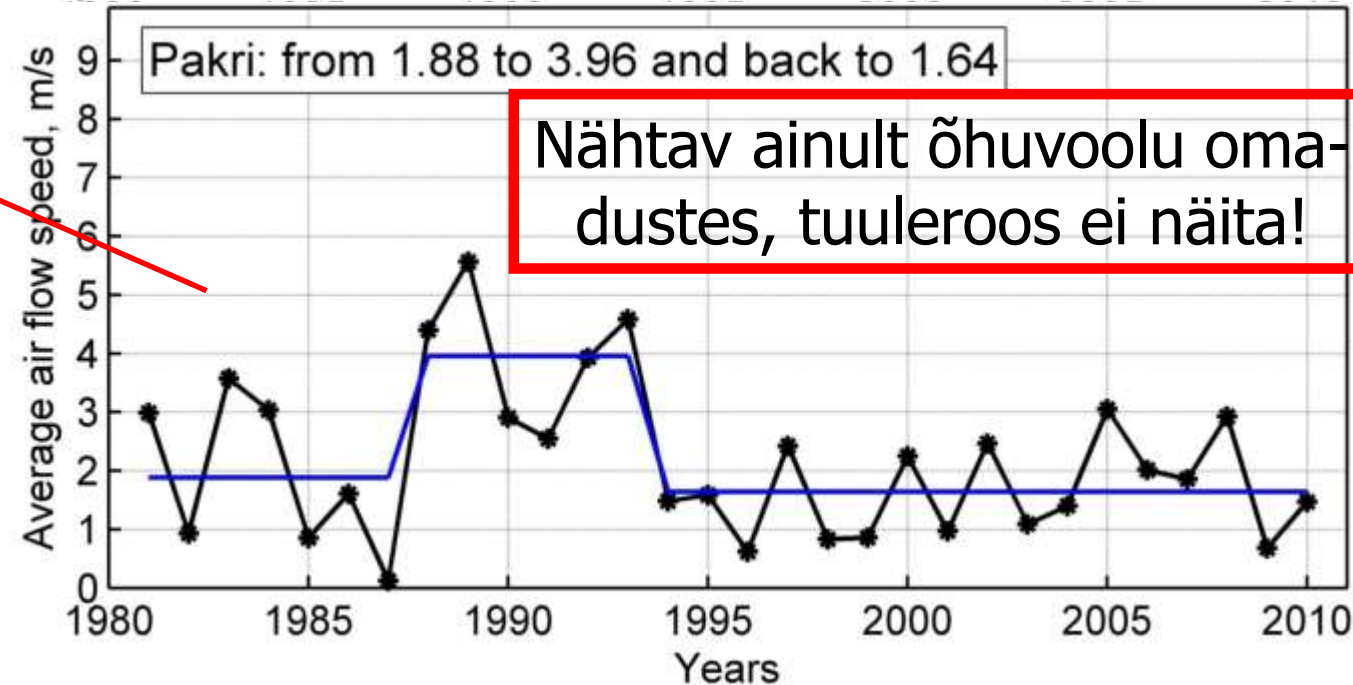
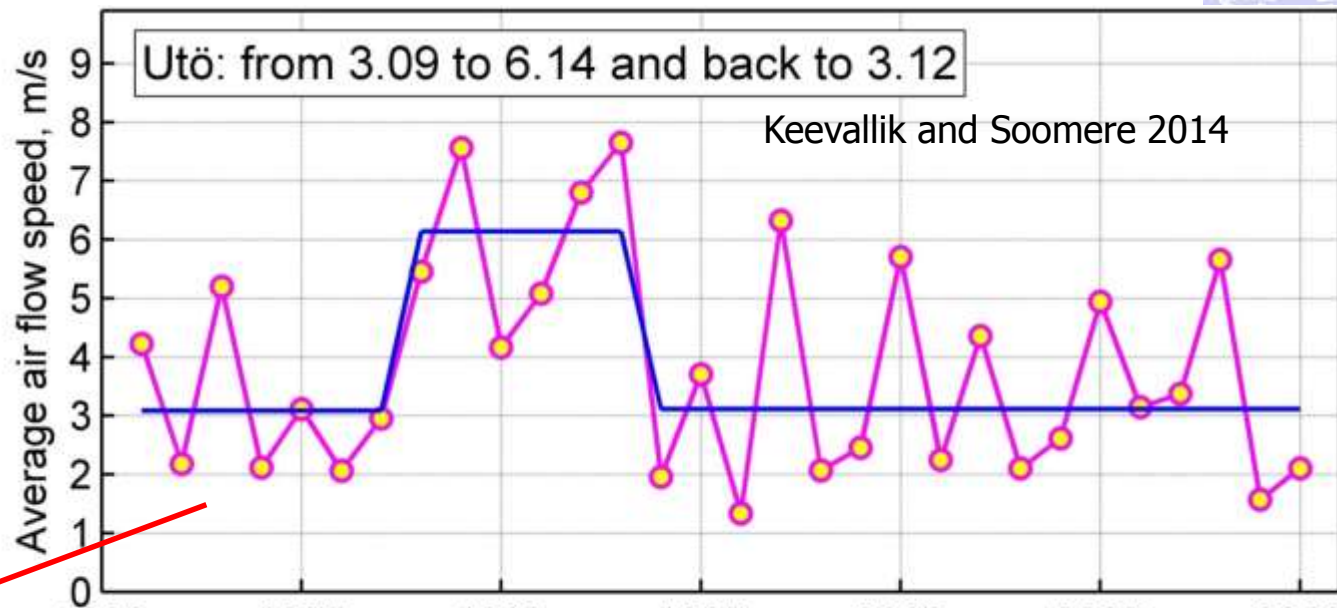
- ~40 kraadi Läänemere lõunaosas
- Äkitselt: ühe aasta jooksul



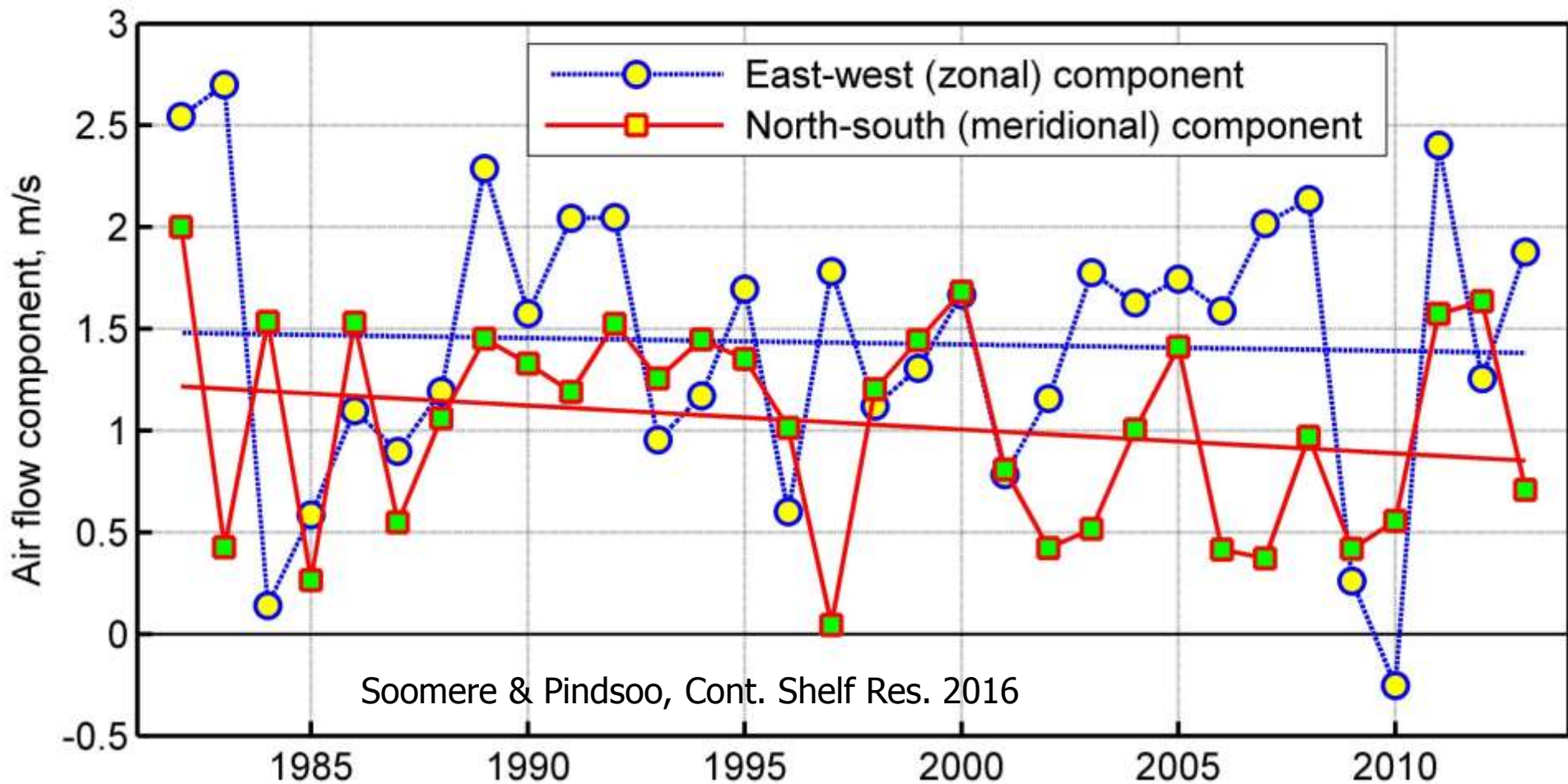
Muutuste kiirus: mõni kuu



Kogu kliimasüsteemis käis kõva raputus: režiiminihi

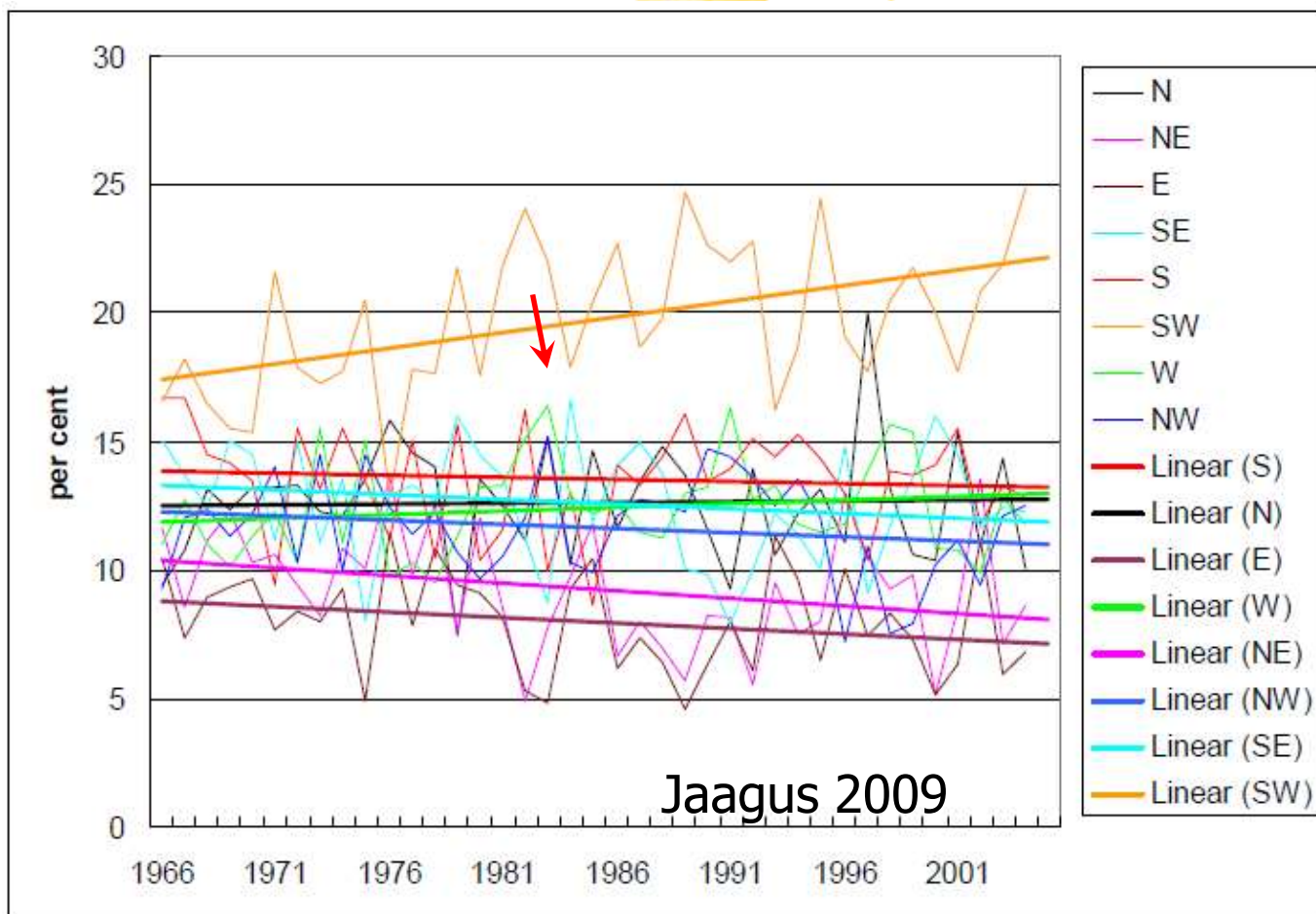


Õhuvoolu suund muutus isegi Soome lahel



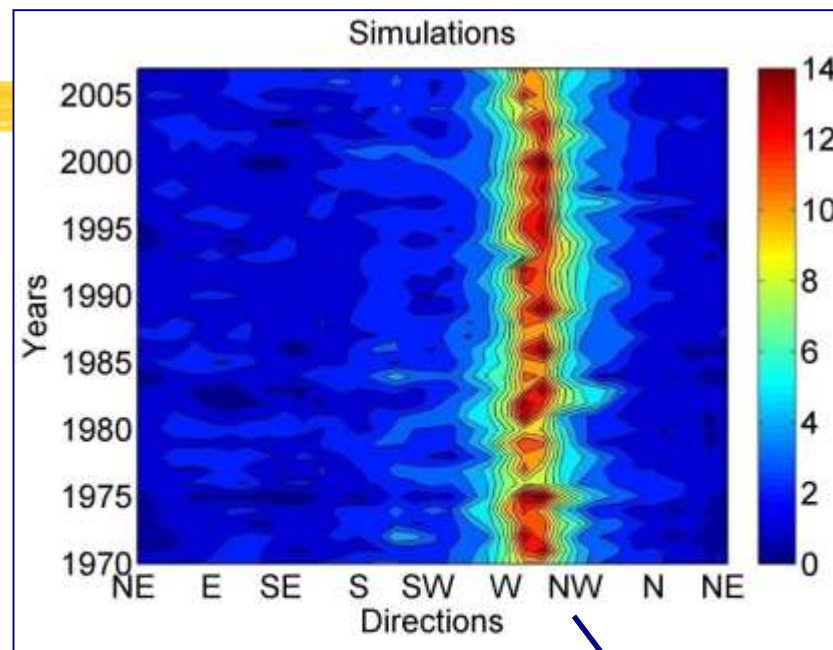
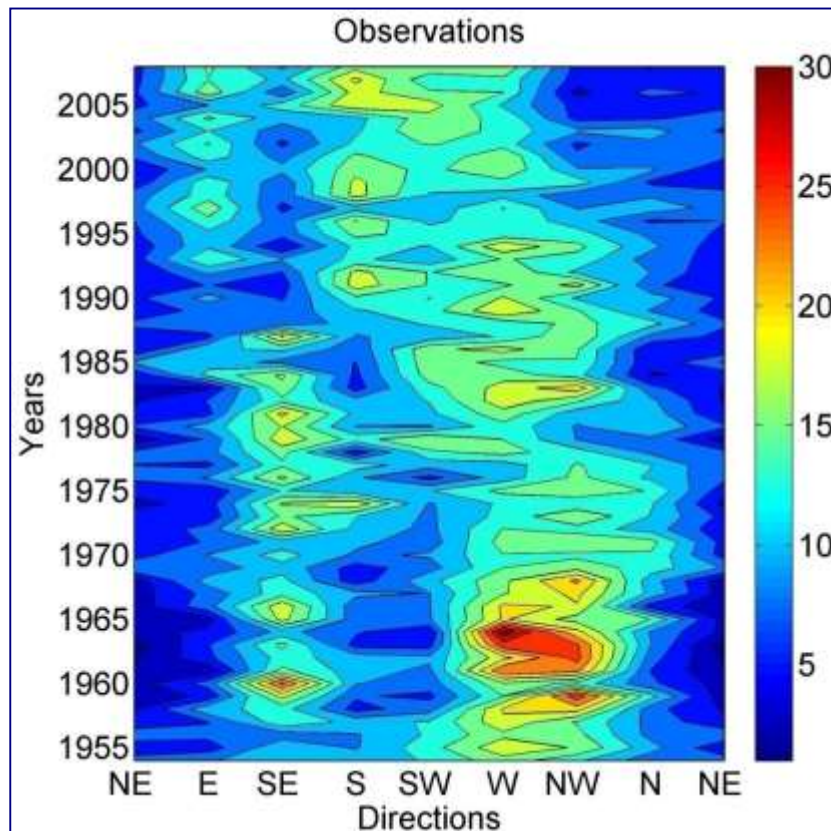
Nähtav ka klassikalistes parameetrites

SW tuuled: sagedus kasvas 17% → 23%



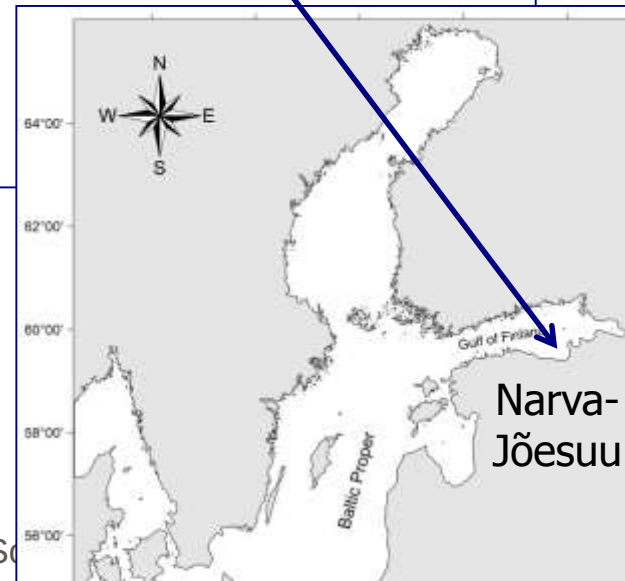
Ootmatu indikaator: lainete levikusuund

Color code shows the frequency of occurrence (%) of waves from a particular direction



Räämet et
al. 2011

- Tüüpilise laineleviku suuna muutus Narva-Jõesuus: ca 90 kraadi
- Mudelid ei suuda reprodutseerida



Kolmas osa



Mere reaktsioon:
rahutu rannik

Kuidas meri reageerib muutustele

Reaktsiooniaeg:

- Ookeani veetase >50 aastat
- Läänemere veemass ~30 aastat
 - Soolsus, püknokliini asend ~10 aastat
- Tsirkulatsiooniskeem ~1-2 aastat
- Pinnakihi temperatuur ~1 aastaaeg
- Jää tekkimine / sulamine ~1 kuu
- Kohalik veetase ~nädal/päev
- Lainetus mõned tunnid

Läänemere pind on vahel päris kõva





Probleem laevaliikluse
jaoks: paks jää mitme
kuu vältel



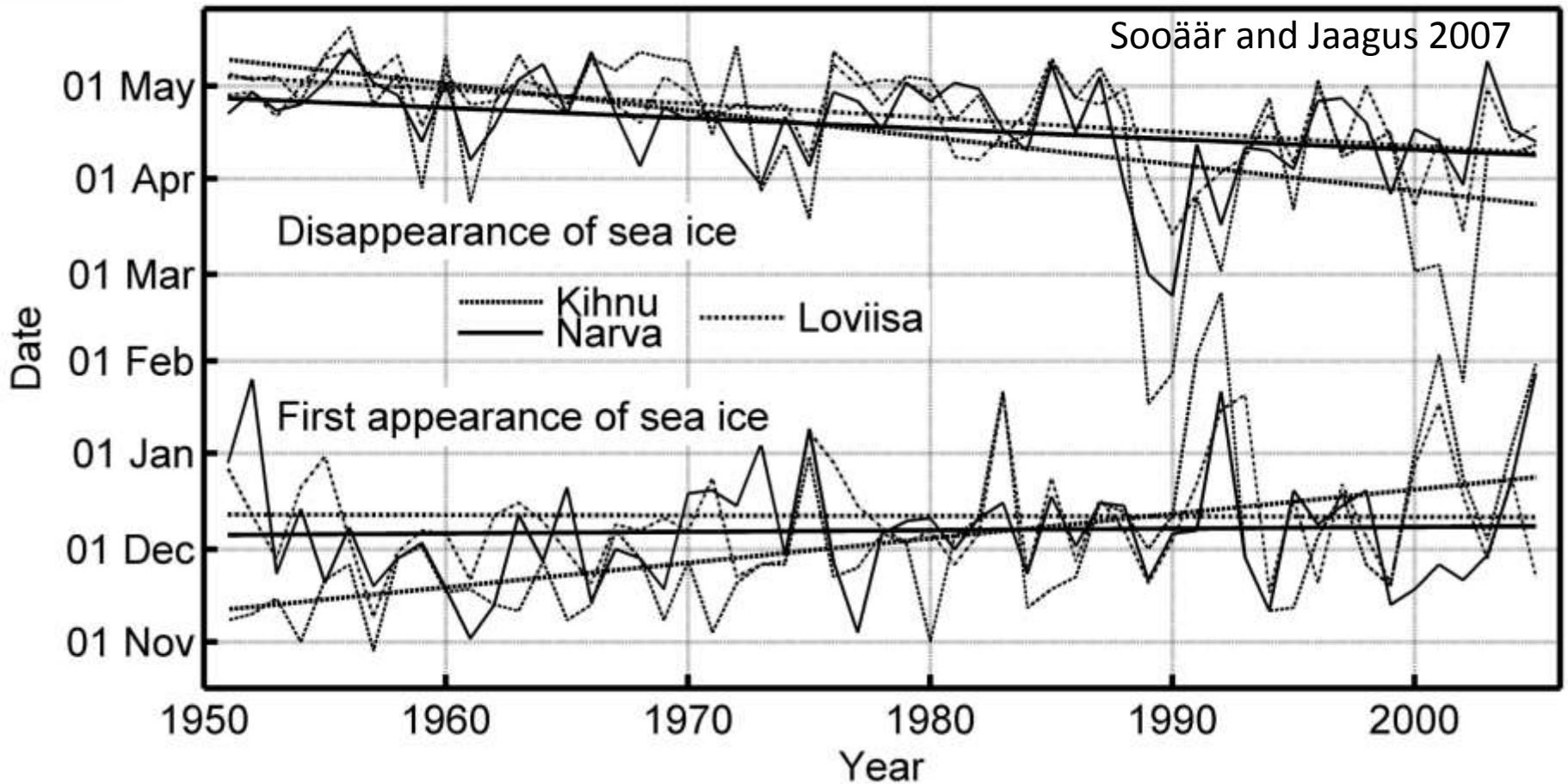
Jäärünnak on lõhkunud maju
(Komarovo, Neeva laht, 2008)



Ryabchuk et al., 2011 BER



Varjatud oht: jääperiood lühenemine



- Jääkatte tekib harvem (vähenemine 20% viimasel 100a)
- Jää kaob 10 päeva võrra varem (100a kohta, Utö saar) (Jevrejeva and Leppäranta)

Liiva- ja kruusarandade tervis:

Pole jääd == rand pole kaitstud kõrge veetaseme ja tugevate lainete eest

- Veetase märksa kõrgem kui jääga kaetud merel
 - Lainete energia jõuab rannaseteteni
 - Rannasetted: pole külmunud

Eriti ohtlik: kõrge veetase + lained + lahtine liiv

(Komarovo, Neva Bight, 29 October 2006

11 January 2007)

Ryabchuk *et al.* 2009, 2011

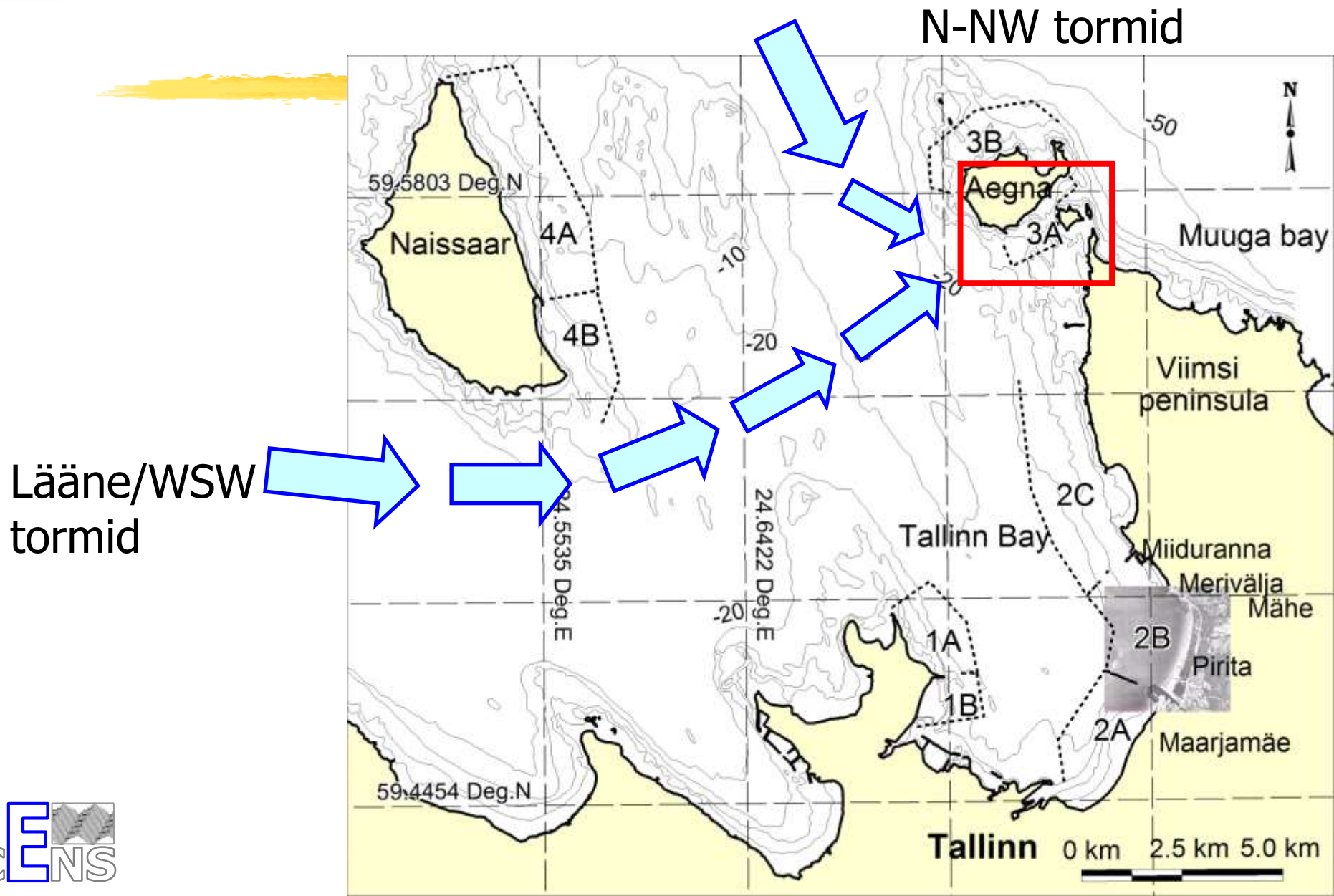


Laevalained: lainekliima muutuste väike mudel

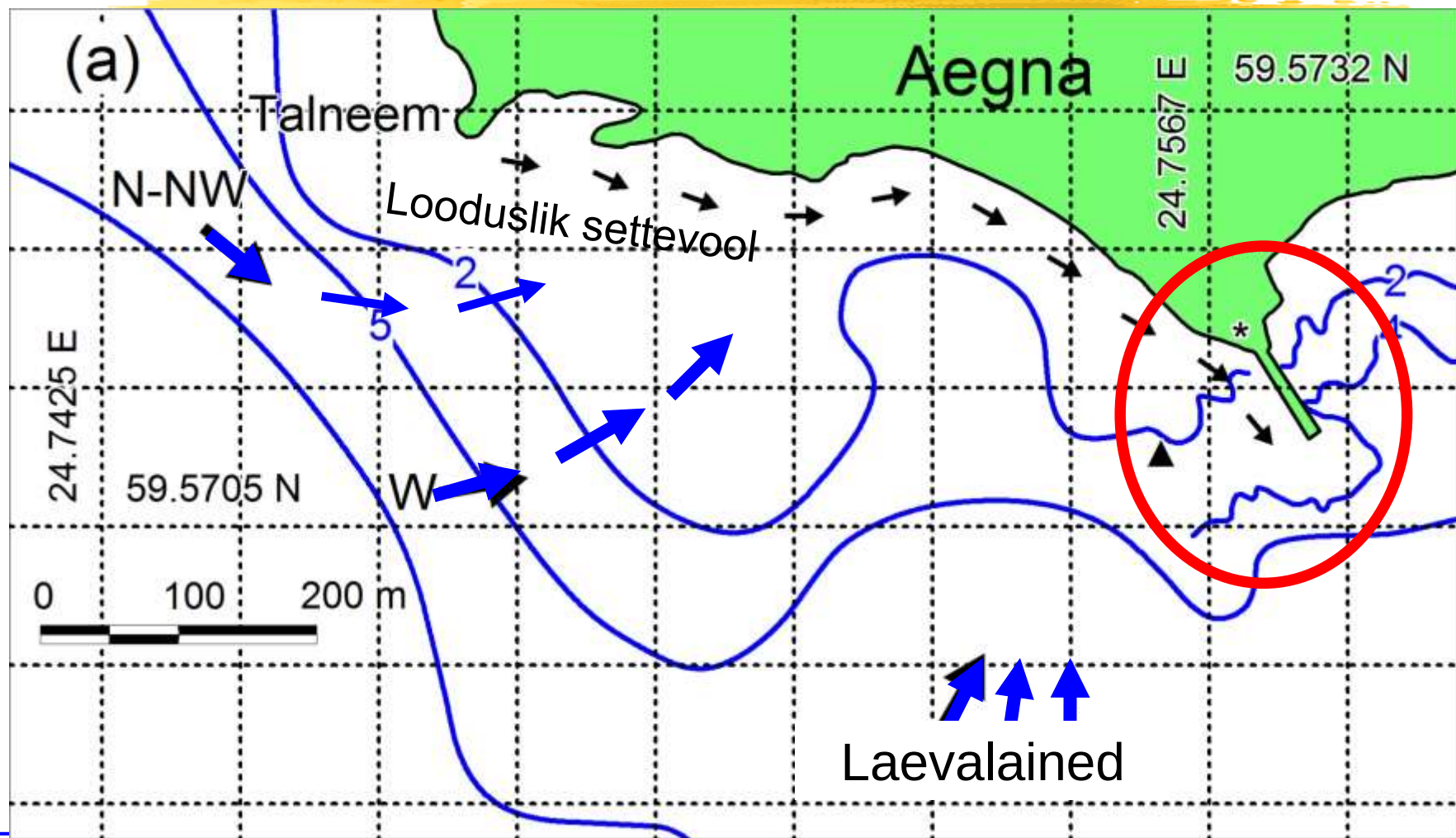
Kliimamuutused lainete maailmas: mis muutub?

- Lainekõrgus (keskmine/ekstreemne)
- Periood / pikkus
- Levikusuund
- Jaotusfunktsioonid (Rayleigh? Lainerühmad?)
- Mõrvarlainete esinemise võimalus/sagedus

Kõrged tormilained Aegnal



Tormilained ja laevalained: erinevad levikusuunad → erinev settevoolu suund



Mis sünnib rannal kahe lainesüsteemi koosmõjus:



Enne

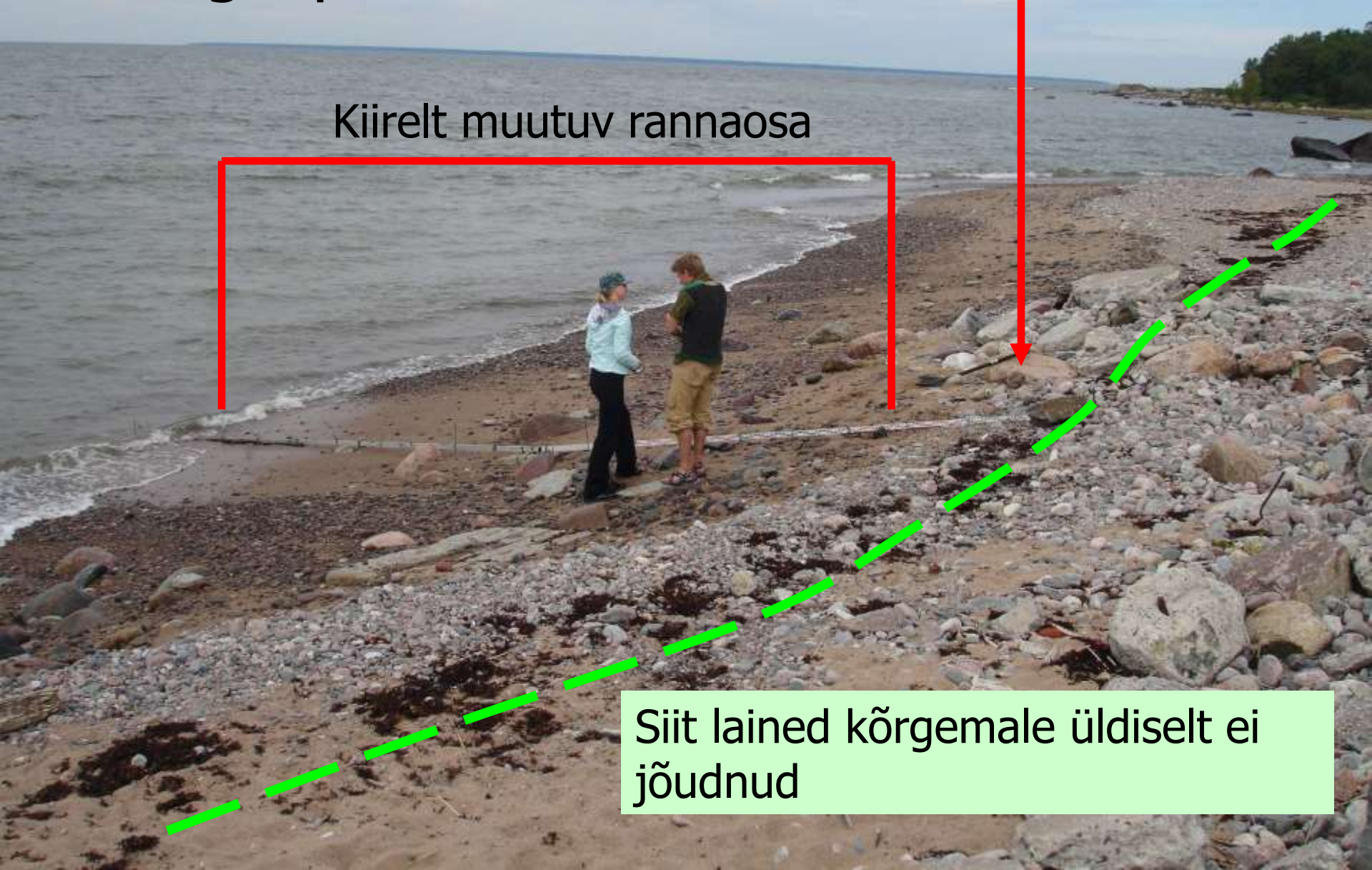
Laevalained

Pärast

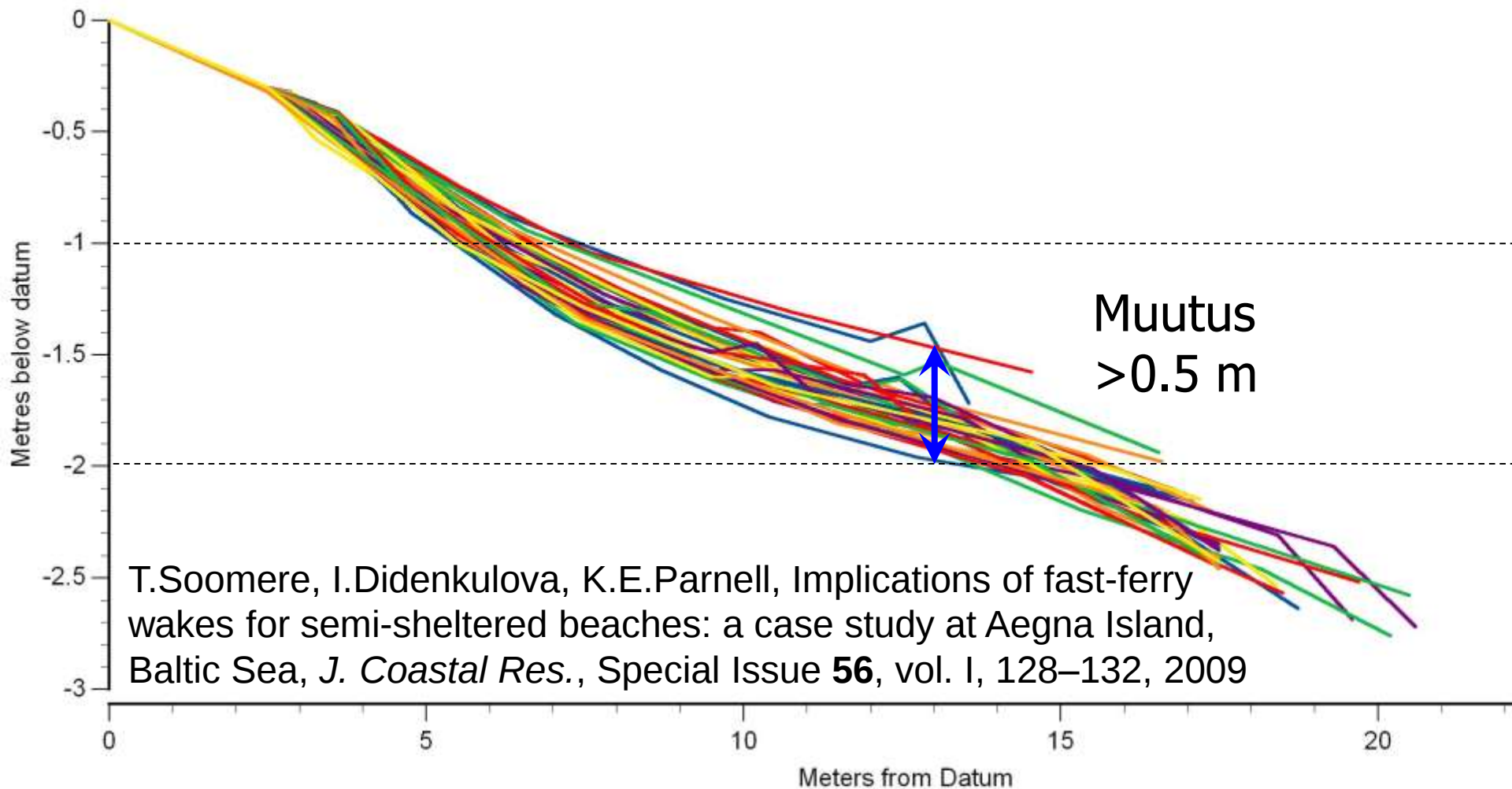
Alguspunkt: suur liikumatu rändrahn

Kiirelt muutuv rannaosa

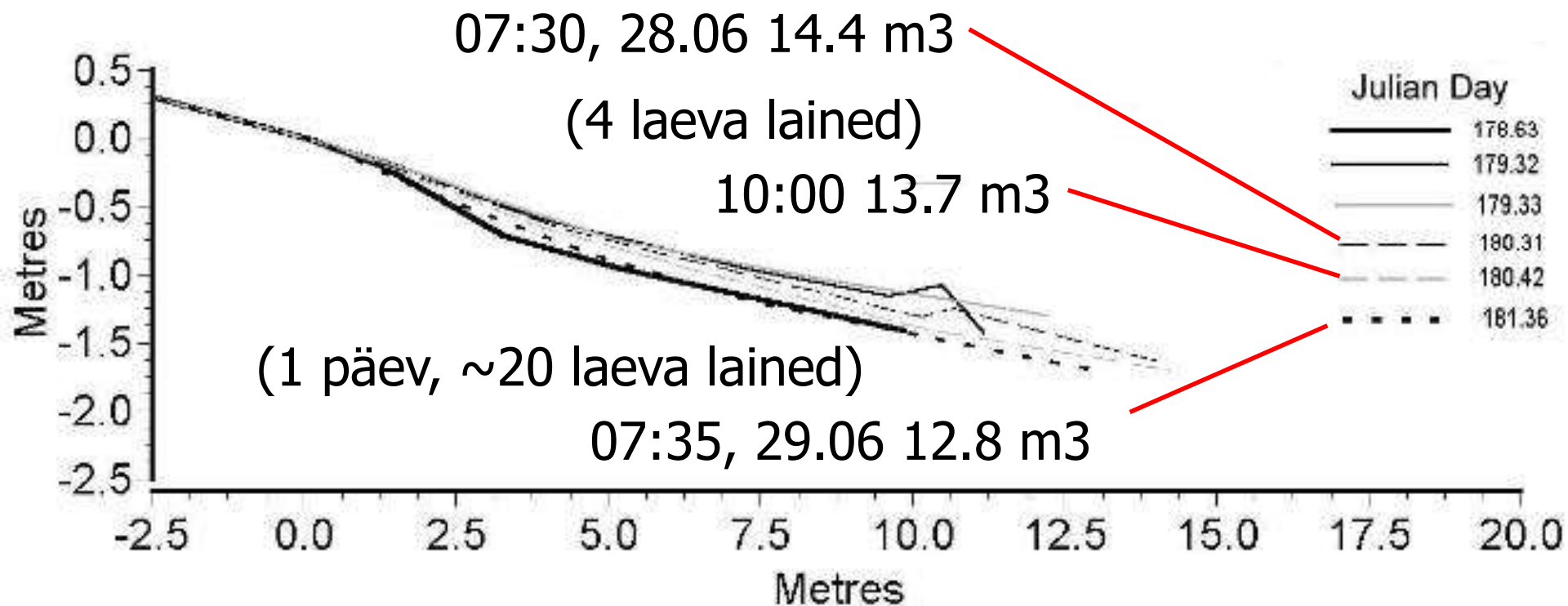
Siit lained kõrgemale üldiselt ei jõudnud



Aegna 2008: Ootamatult kiired rannaprofiili muutused



Ranna ülikiire reaktsioon vaikse ilmaga



Laevalained II:

Mõõdulint



ehk mida suudavad teha kaheksa
laeva lained 10 cm suurustele kividele

Indikaatorid: värvitud kivid

Kolm suurust:

- Kruus. (1-2.5 cm)
- **Veerised (2.5-5 cm)**
- **Munakad (5-10 cm)**

~35 liitrit kive igast
suurusklassist paigutatud
veepiiri lähiste



Kivide kannul

- Kivide paiknemine mõõdetud diferentsiaal-GPSiga (1-2 cm täpsus)
 - 27 juuni -07 juuli 2013 (9 päeva)
 - Igaks juhuks veel kord 10 oktoobril 2013

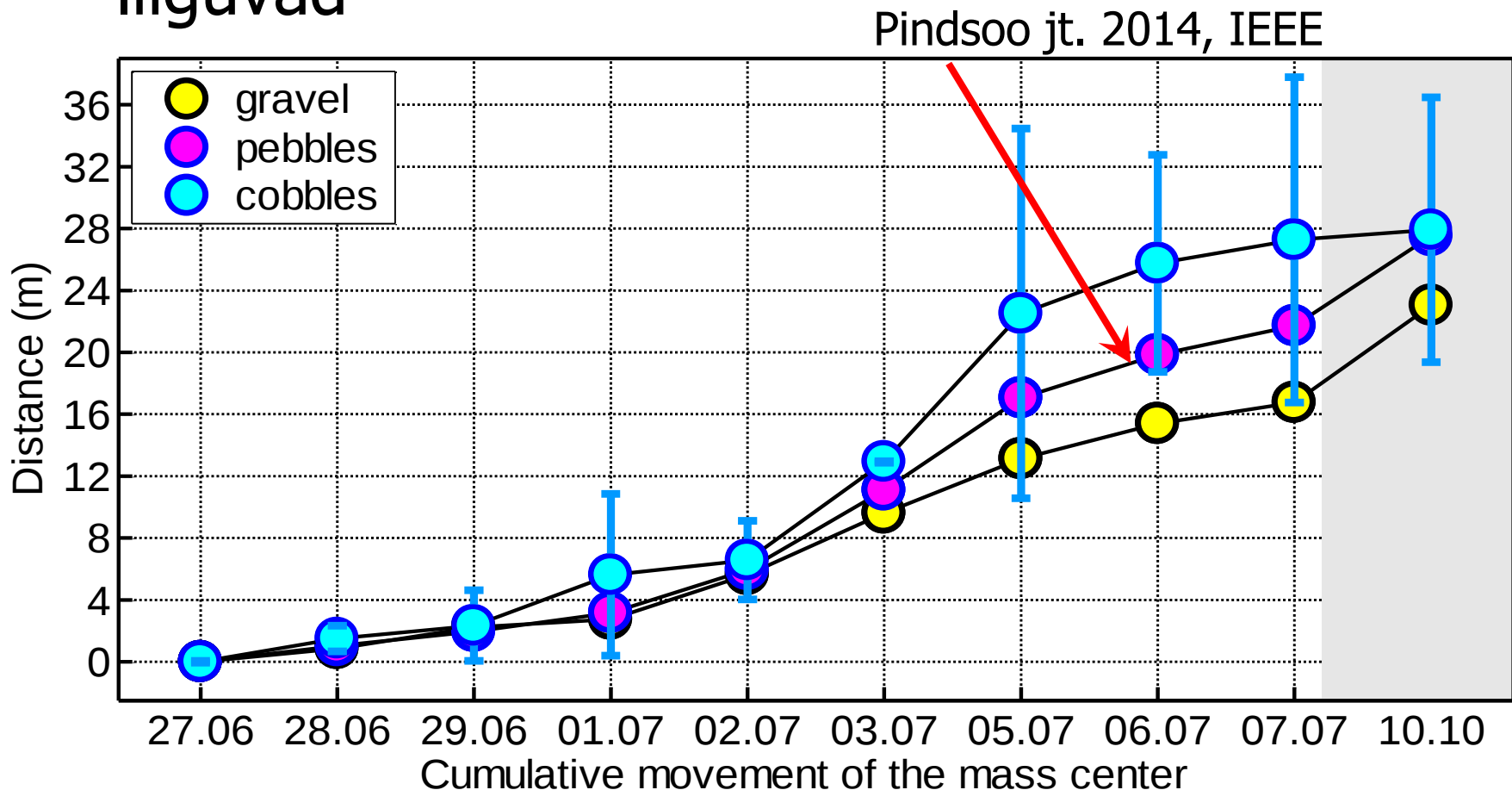


Ilm: suhteliselt vaikne

- Tuulelained:
 - Üldiselt alla 0.2 m, lainerünnak kuni ~ 0.3 m
 - Kõrgeimad üksiklained 0.6 m
- Laevalained: kaheksa laeva päevas
 - kõrgus: kuni ~ 1 m, lainerünnak kuni 1.7 m

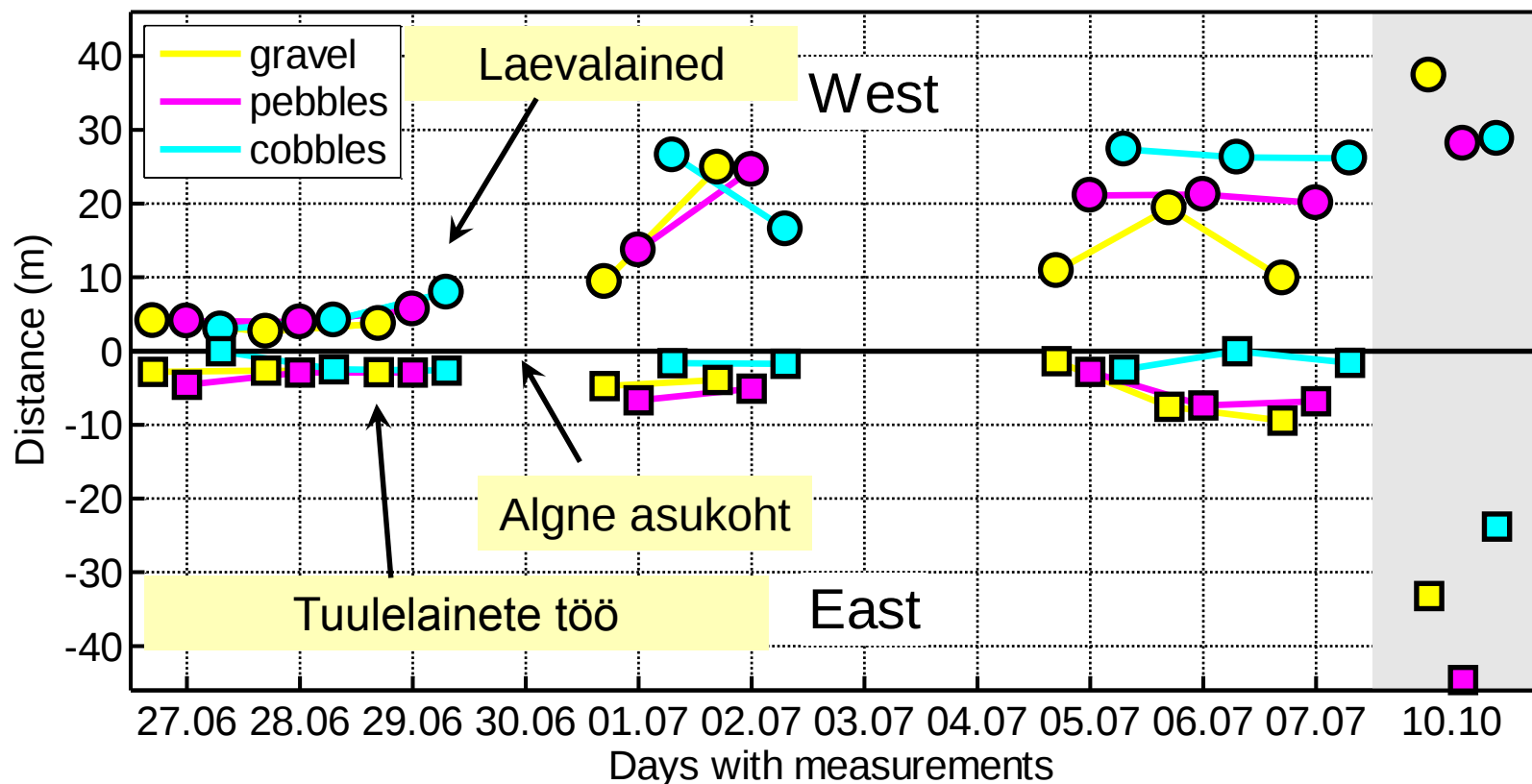


- Massikeskme liikumine: 16-28 m / 9 päeva
- Keskmiselt 2-3 m/päevas; <1 m kõrgused lained liigutavad kergesti 5-10 cm kive
- Huvitav: mida suuremad kivid, seda kiiremini liiguvad



- Kiireimad kullerid: lääne suunas
- Kuni 18 meetrit päevas
- Sügisel pöördusid tagasi

Pindsoo jt. 2014, IEEE



Lihtne järeldus:

Niipea, kui muutuvad meie
randu mõjutavad lained:

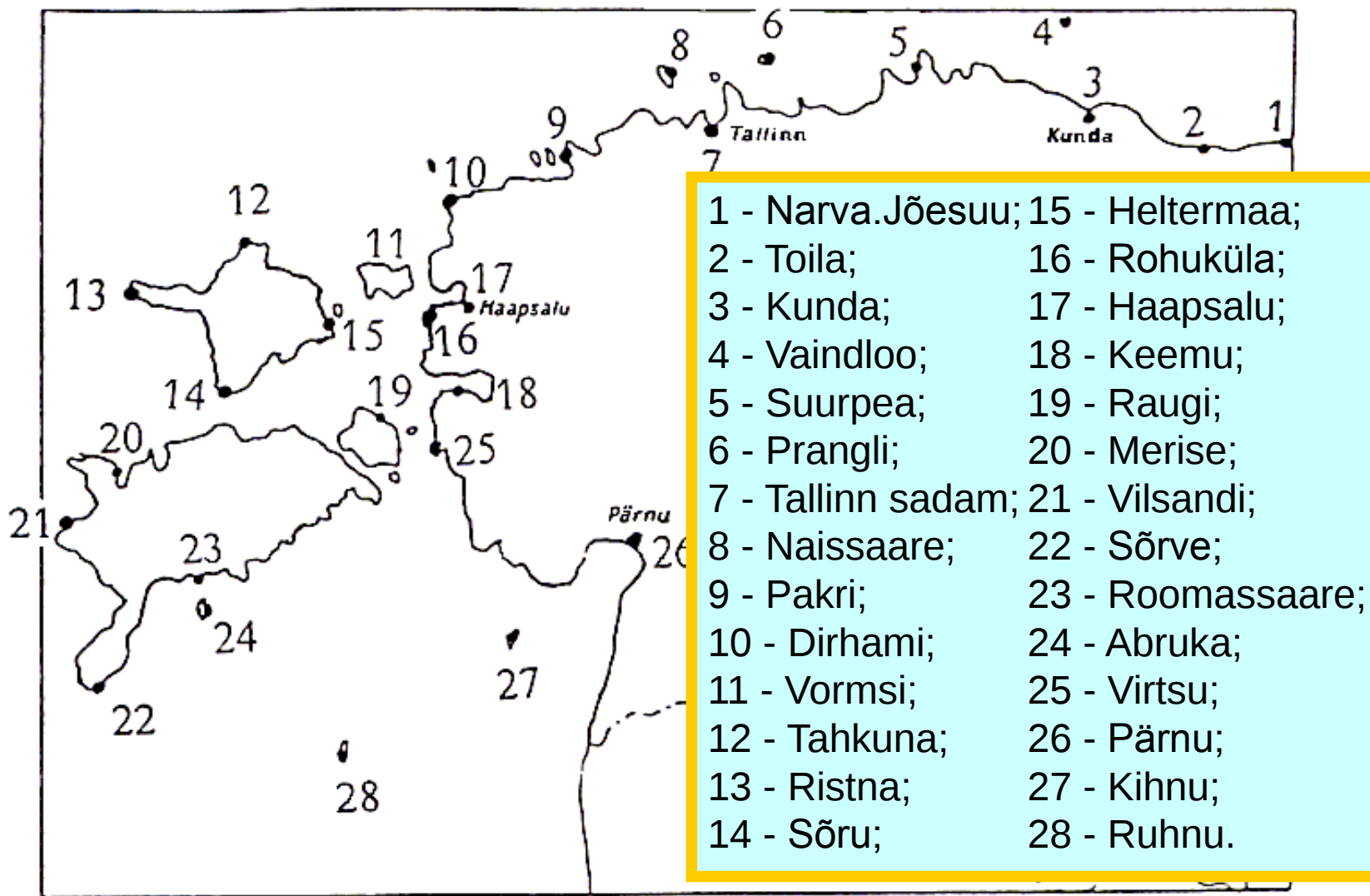
- toimuvad muutused meie
randades
- ja kiiremini, kui arvata
oskame

Neljas osa



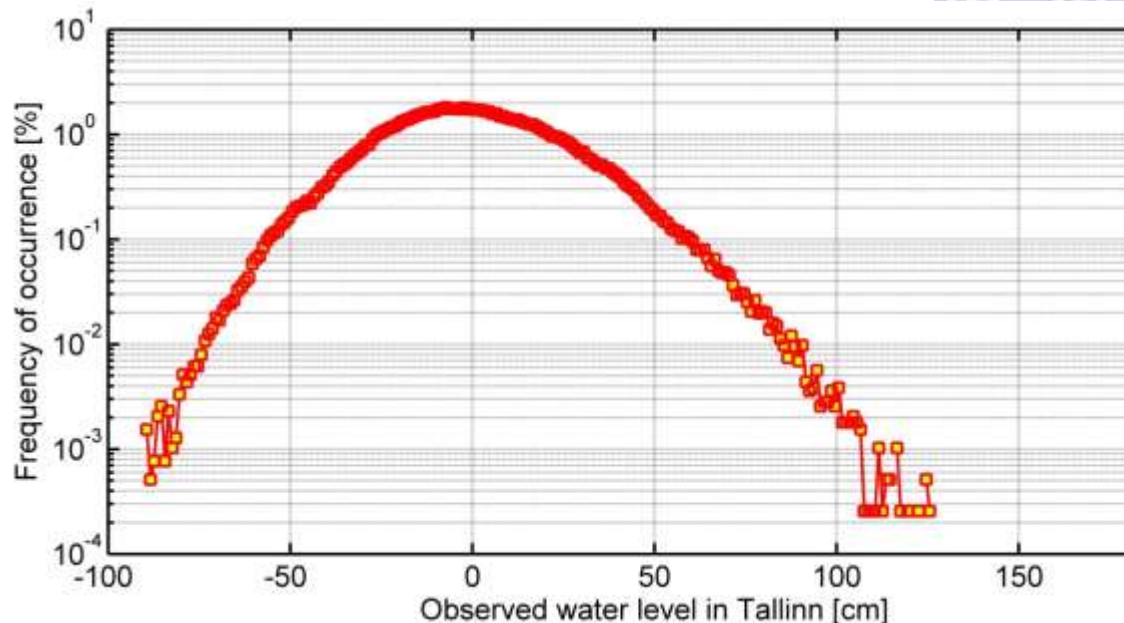
Mere valuline reaktsioon:
Ekstreemsed veetasemed ja üleujutused

Veetaseme mõõtmine Eestis: pikka aega paljudes kohtades



Palju aspekte usaldusväärselt teada

- Tõenäosusjaotused
- Pikaajalised keskmised
- Trendid
- Sesoonne muutlikkus
- Prognoos
-



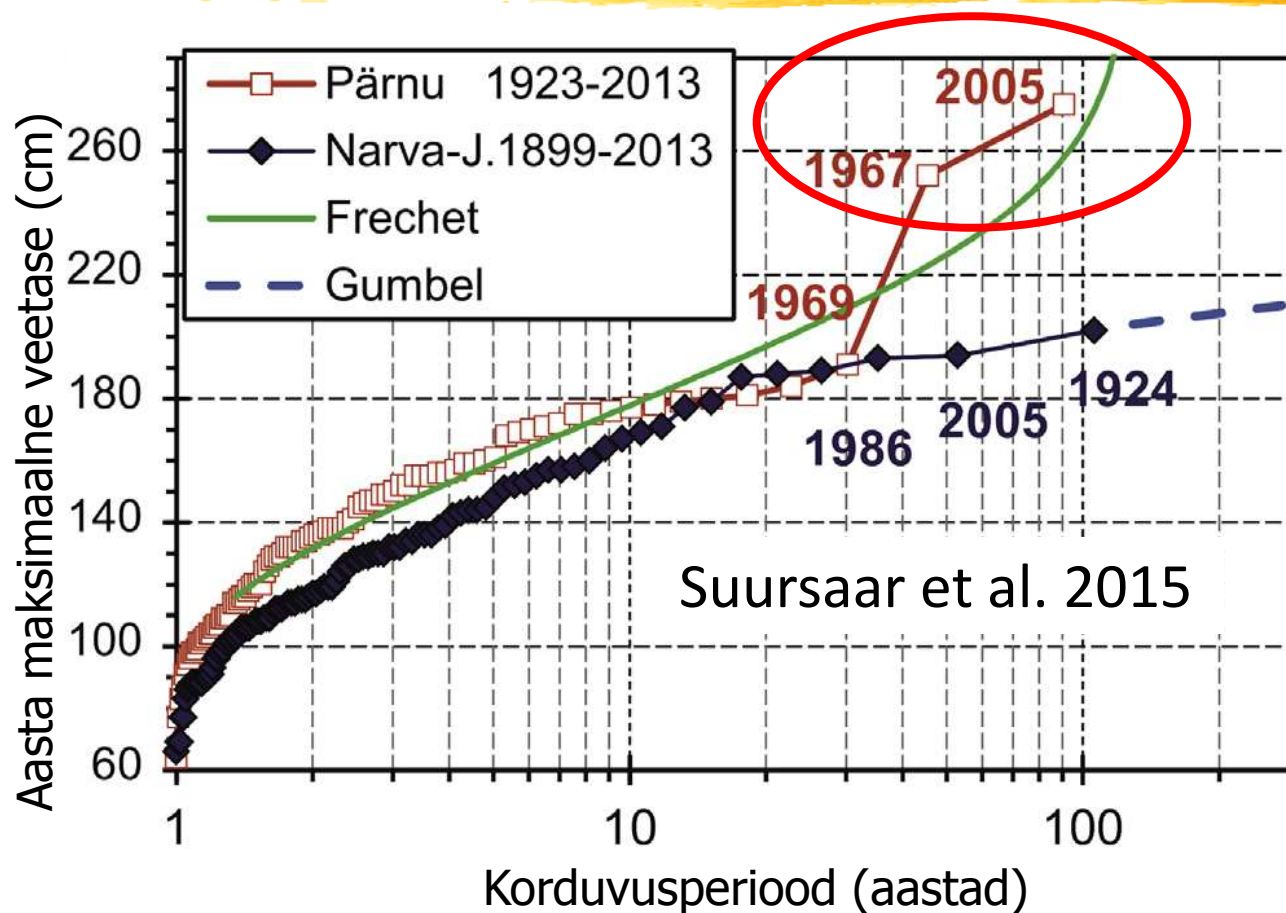
Aga vahel...



Küllike Rooväli, Postimees



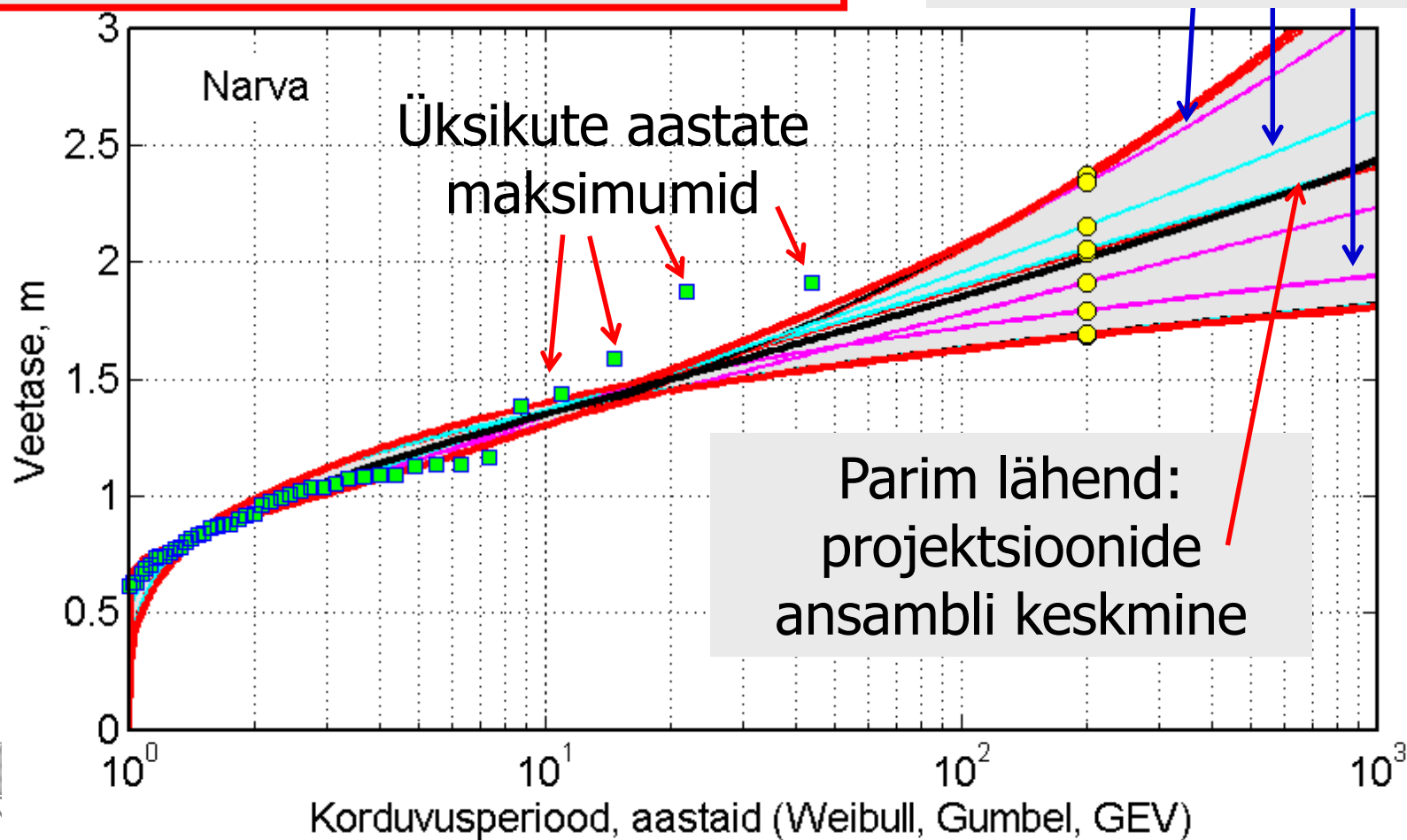
Ekstreemsed veetasemed: meie pingeline tulevik?



Veetasemete projektsioon tulevikku: parim lähend on ansambli keskmine

Oodatava maksimaalse veetaseme kasv korduvusperioodi kasvamisel ei täheda kliimamuutust!!!

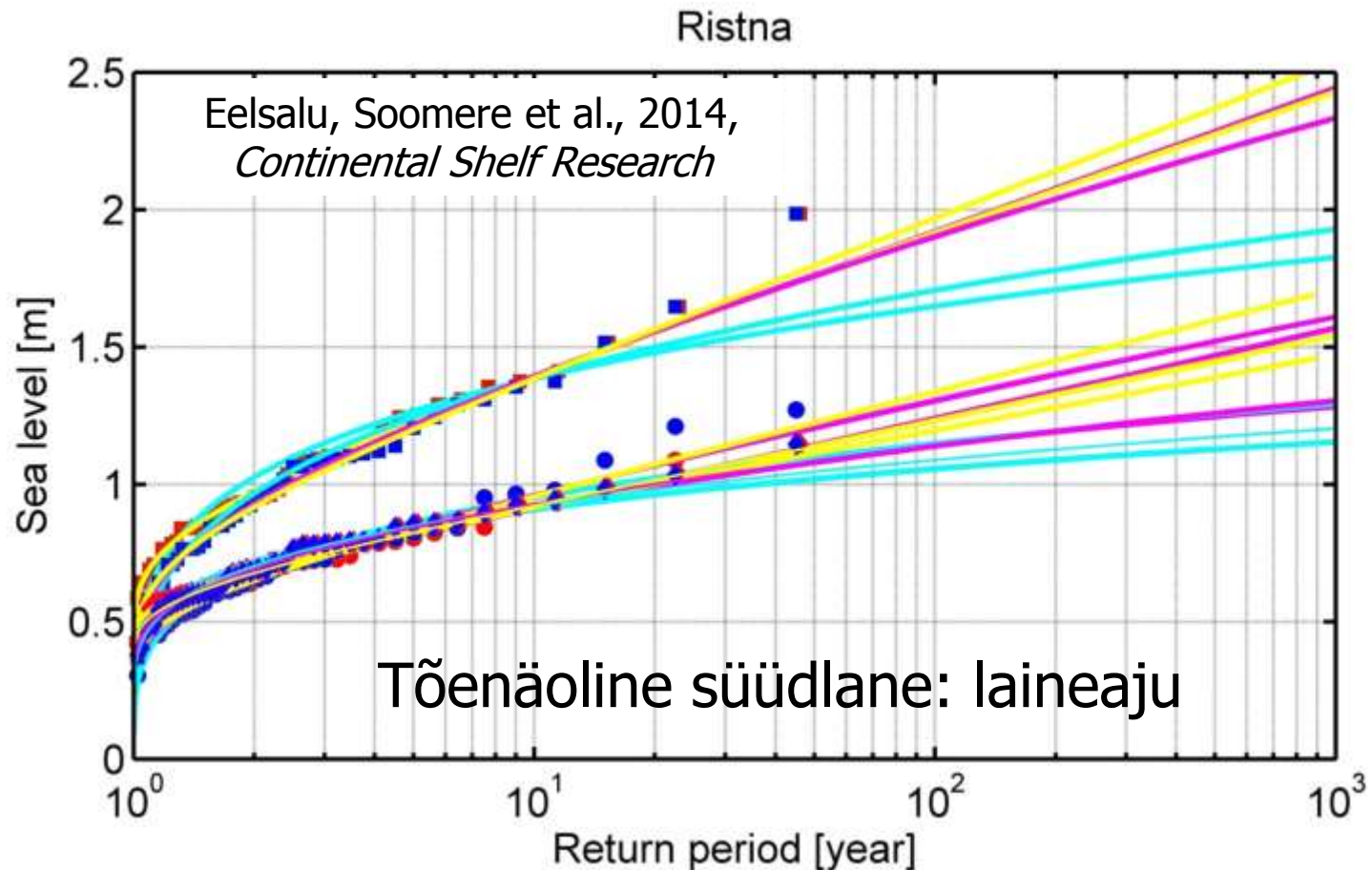
Erinevate teoreetiliste jaotuste alusel tehtud projektsioonid



Ääremärkusi

- Ekstreemumite suurenemine vaatlusrea pikkuse kasvamisel on (ka statsionaarse) juhusliku protsessi loomulik koostisosa
- See ei pruugi tähendada (kliima) muutumist
 - Isegi kui muutus on formaalselt statistiliselt oluline mingil nivool
- Statistiliselt oluliste muutuste identifitseerimine & protsessi mittestatsionaarsuse tõestamine: sügavalt mitte triviaalne ülesanne

Ootamatu probleem: milline projektsioon on õige?



Probleemi allikas: **murdlainete** tõttu lisanduv veetõus

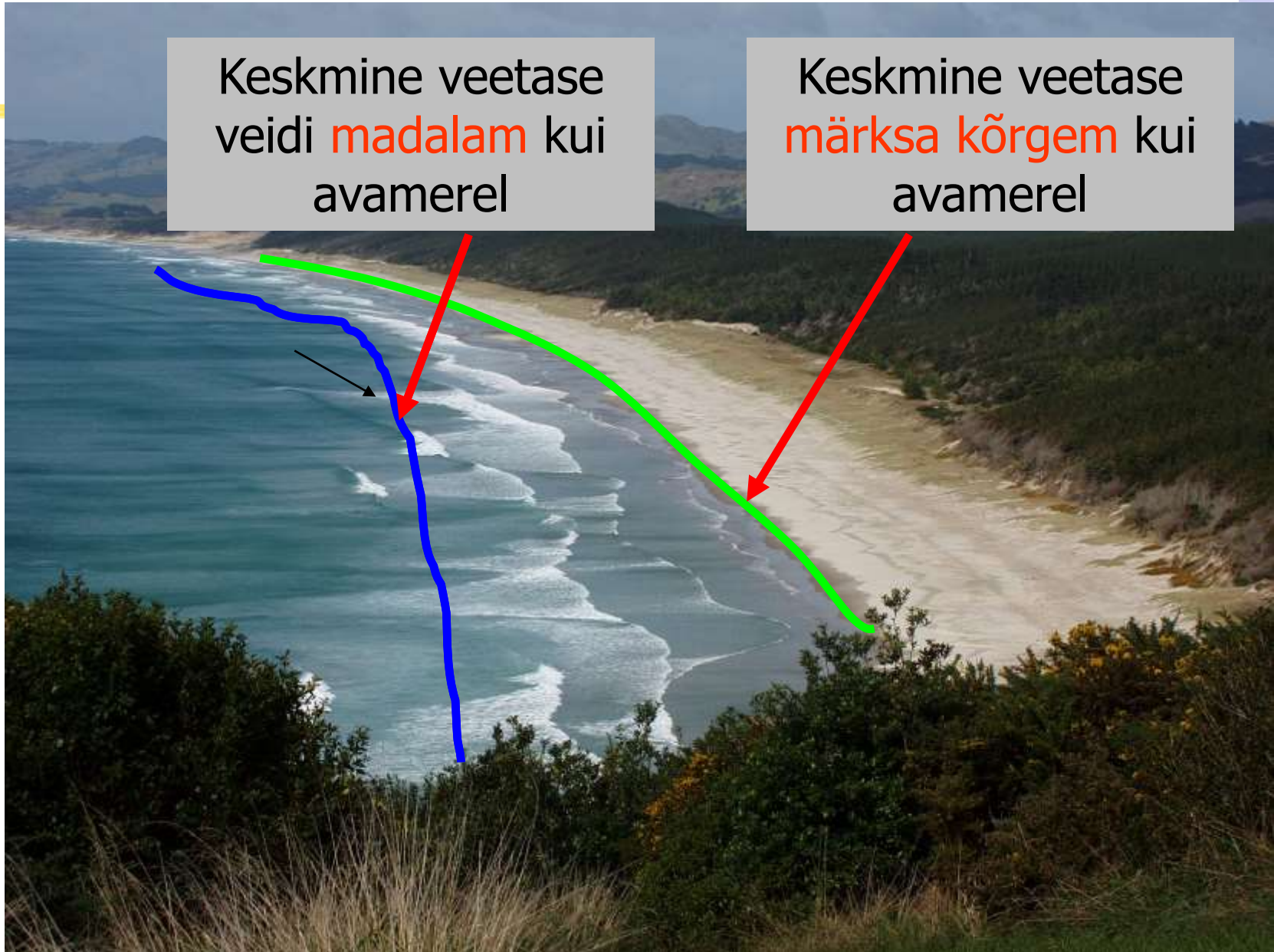


Eelsalu, Soomere et al., 2014,
Continental Shelf Research

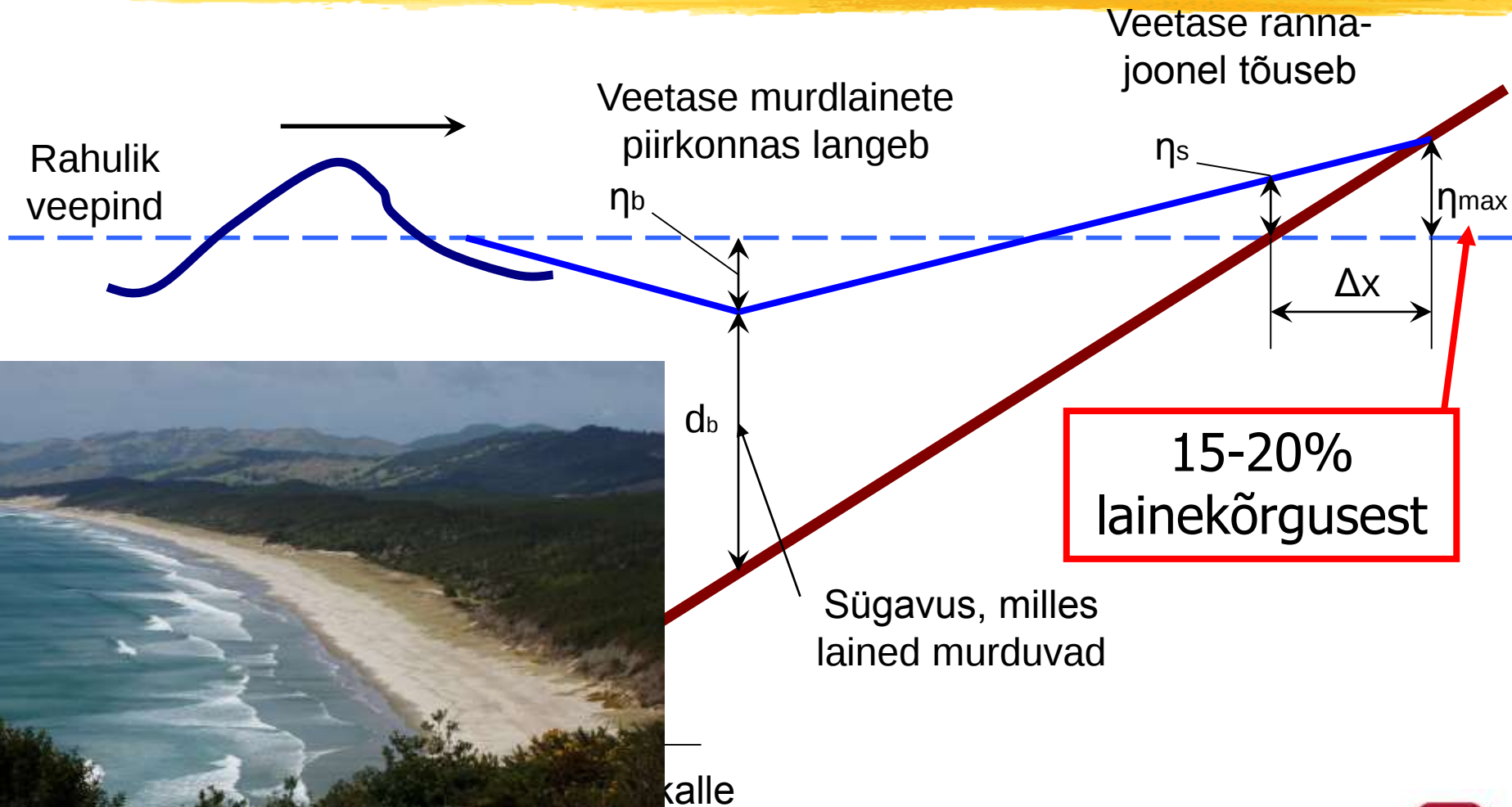
Lained tõstavad ja langetavad veetaset

Keskmine veetase
veidi **madalam** kui
avamerel

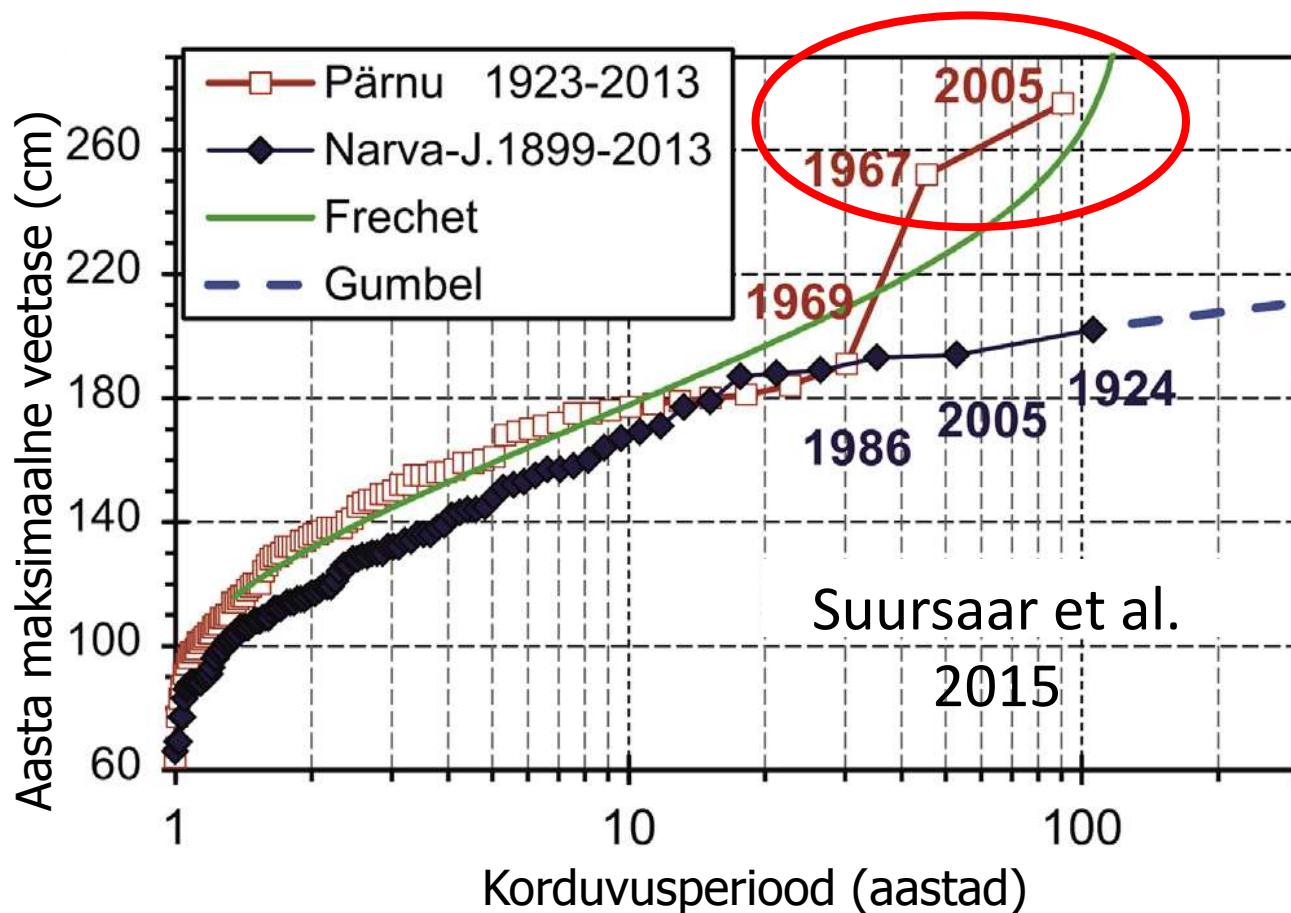
Keskmine veetase
märksa kõrgem kui
avamerel



Murdlainete tekitatud veetõus: impulsi vabanemine



Ekstreemsed veetasemed: kas meie tulevik on keerukam kui oskame arvata?



Suursaar et al.
2015

Probleem (e.g. Suursaar and Sooäär 2007; Suursaar et al. 2015):

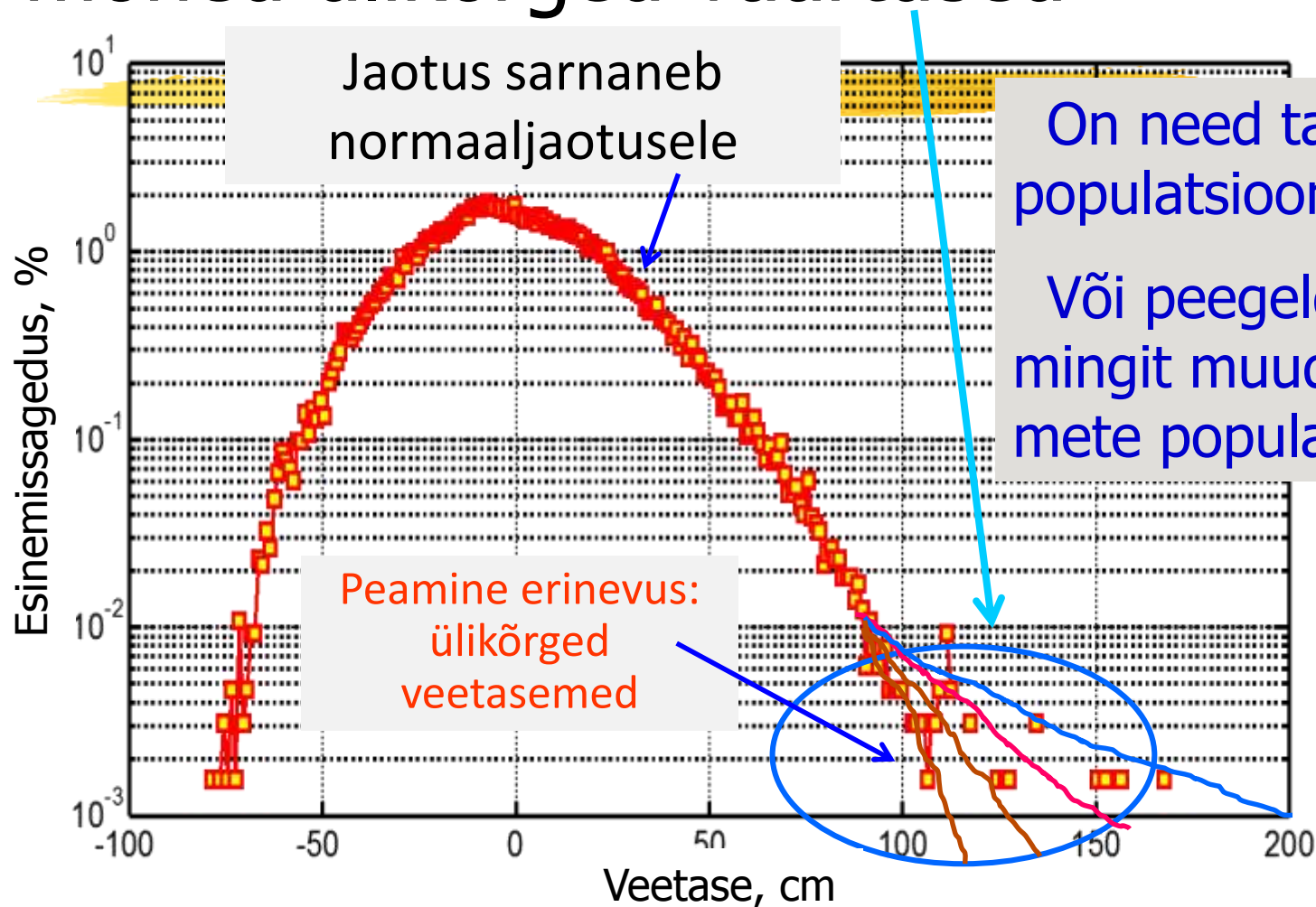
- Üksikud ülikõrged veetasemed (nt Pärnus)
- Statistiliselt peaaegu võimatud suurused
- Tekitatud mitte väga ebatavaliste tormide poolt

Veetaseme maksimumide trendid Eesti rannikul

- Oluline kasv igal pool: 5–10 cm/(10a)
- Ulatuslik ruumiline muutlikkus
 - Suurim kasv: Soome lahe ja Liivi lahe siseosas: 8–10 cm/(10a)
 - Läänemere avaosa: 5–7 cm/(10a)
- Huvitav: väikseimad trendid Saaremaa edelarannikul (mis on kõige enam avatud edelatormidele)



Tüüpiline veetaseme aegjada: mõned ülikõrged väärtused



Küsimus: milline on ülikõrgete veetasemete füüsika

Veetaset mõjutavaid tegureid

A. Klassika kogu maailmas

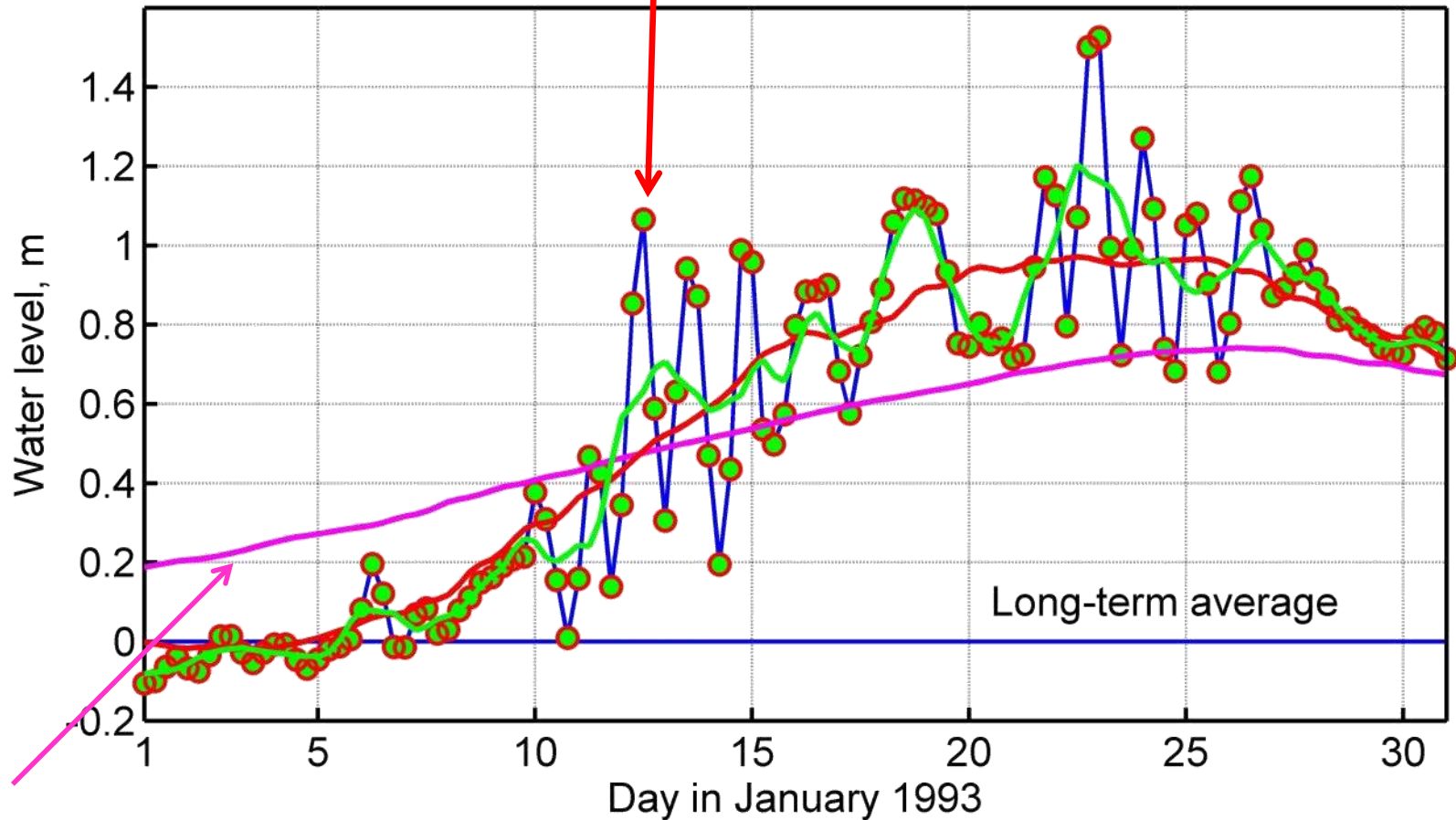
- Tõus-mõõn (Läänemeres <10 cm)
- **Õhurõhk + Tuule mõju**
 - **Tormiaju ~ 1 m**
- Liikuvad õhurõhu häiritused madalmere kohal
 - Meteoroloogilised tsunamid, kuni ~ 40 cm Soome lahe põhjarannikul (Pellikka et al., 2014)
- Üksikutes kohtades rannas
 - **Laineaju** (Tallinnas kuni 80 cm, Pindsoo ja Soomere, 2015)

B. Läänemere spetsiifika

- Vee hulk meres võib oluliselt muutuda
 - **Võimalik kogu mere veetaseme tõus kuni 1 m võrra**
- Erinevad mehhanismid: lõdvalt seotud
- Võimalus eristada nende mõju/osakaalu

Kõrged veetasemed: käivad kimpudena

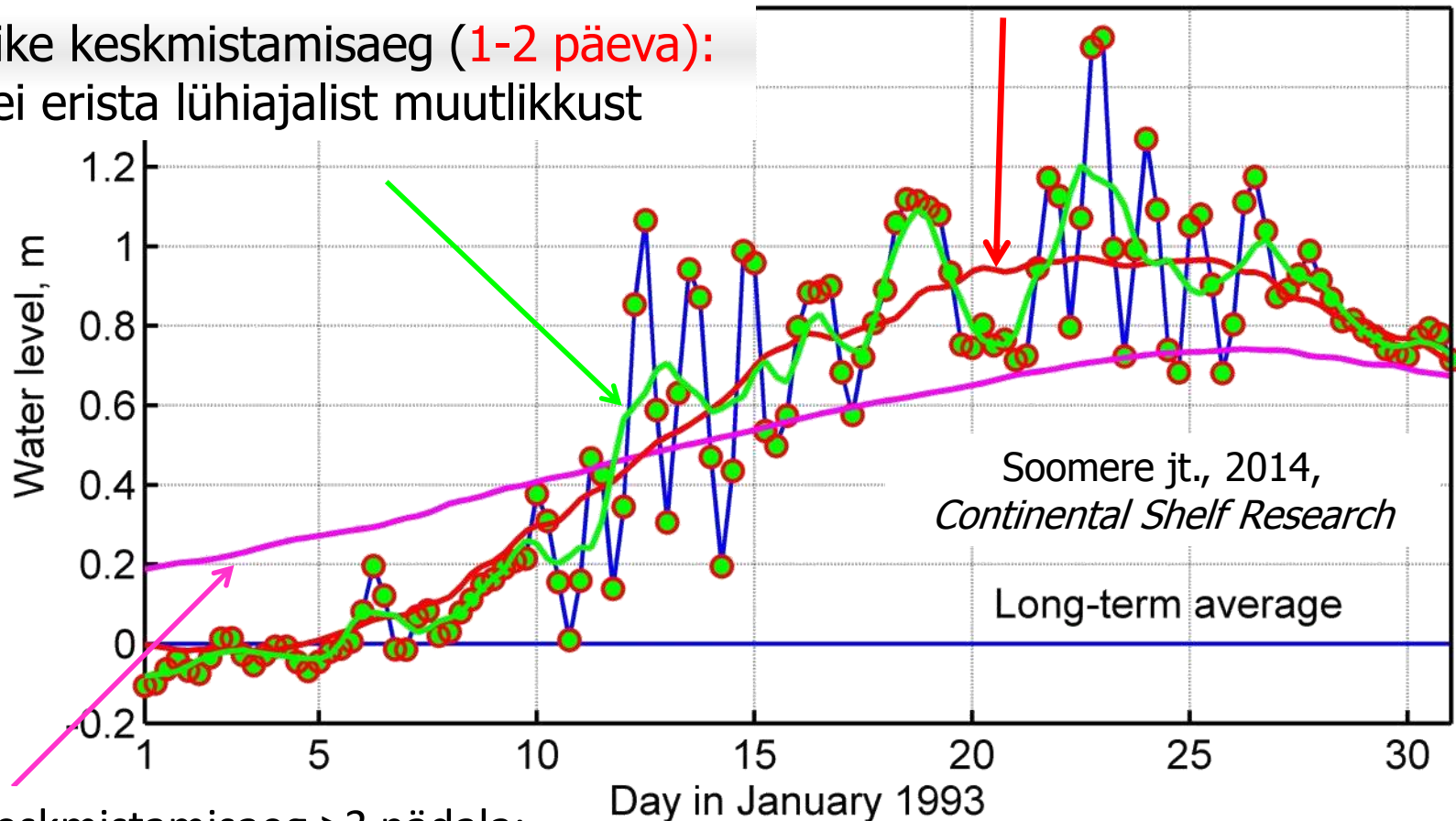
Veetase Kopli lahe
suudmes



Tormiaju ja vee hulk Läänemeres?

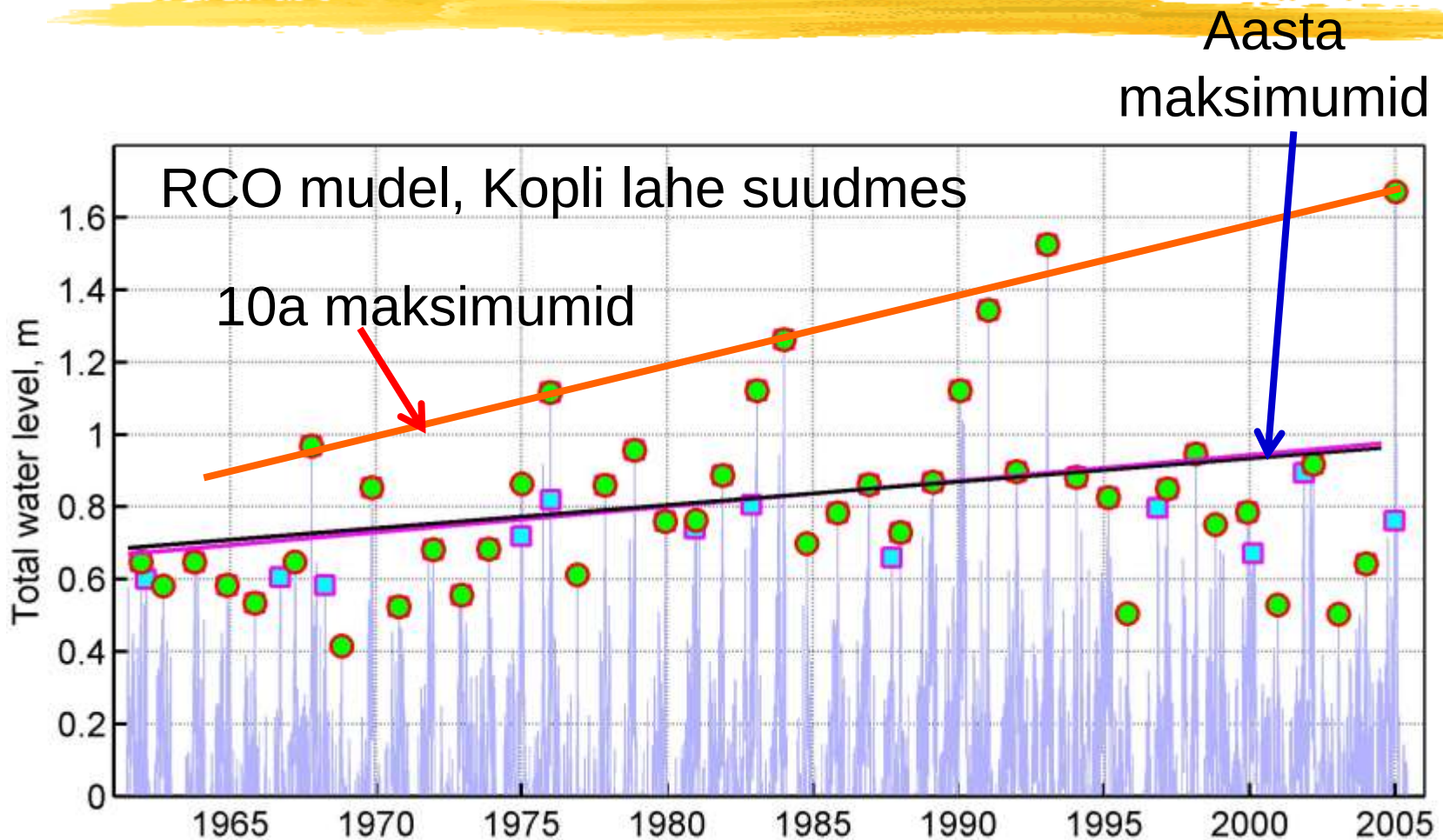
Tundub mõistlik: ca 1 nädal
 – üksikud tormiajud silutud
 - Kogu Läänemere veetase!

Lühike keskmistamisaeg (1-2 päeva):
 ei erista lühiajalist muutlikkust

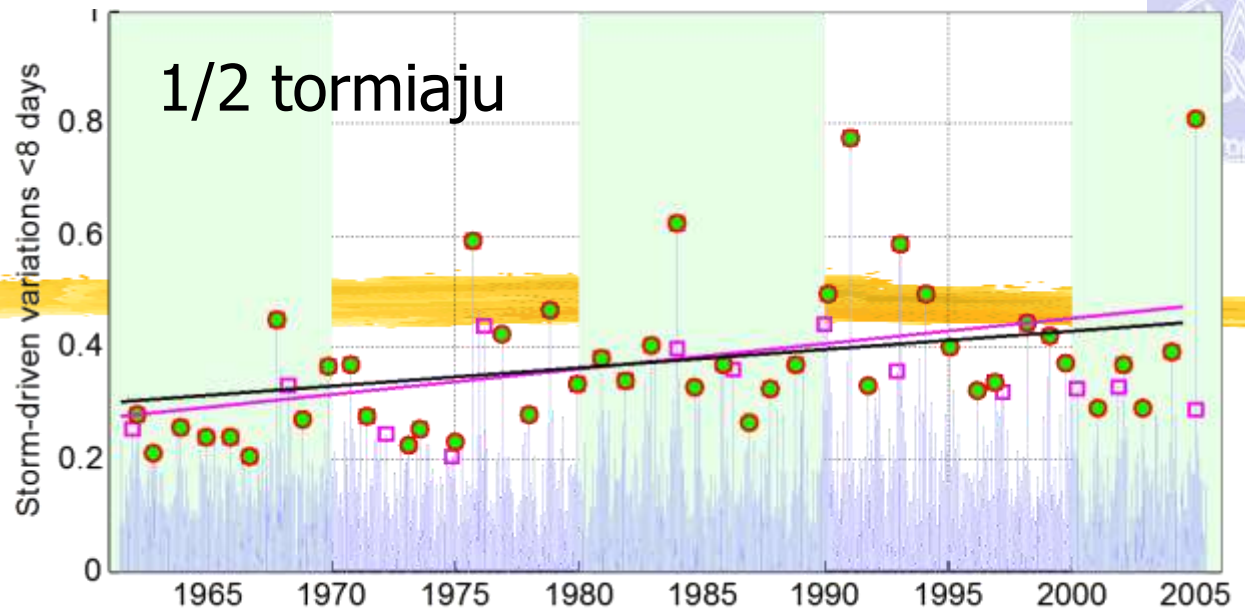


Keskmistamisaeg >3 nädala:
 ei näita korrektselt kogu mere
 veetaseme muutumist

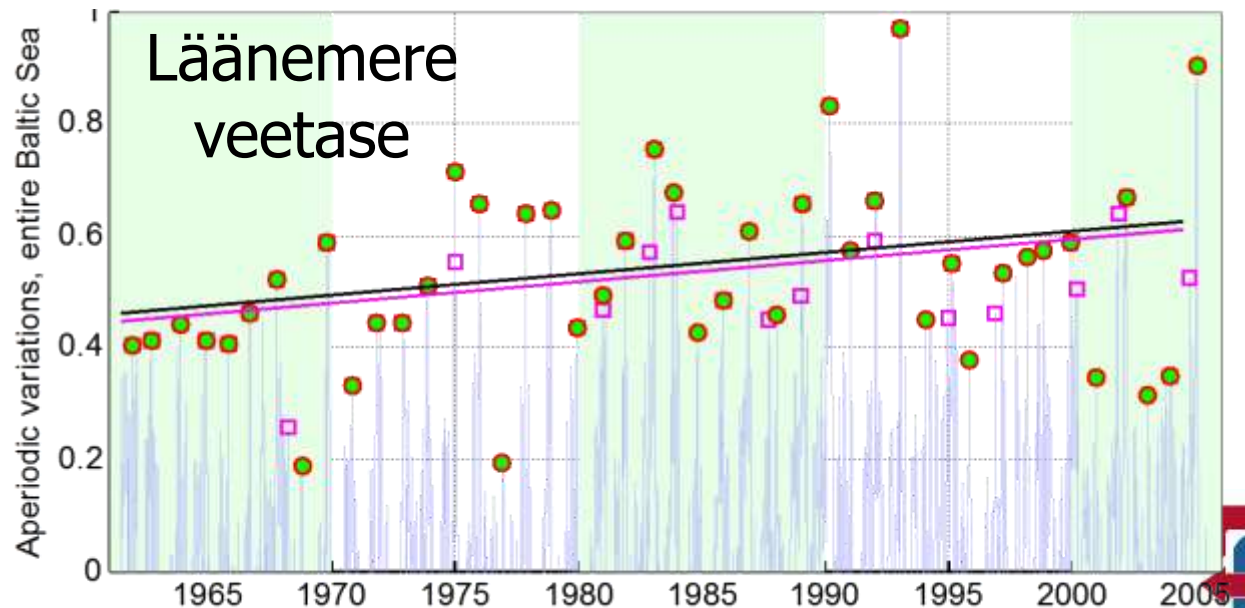
Veetaseme ekstreemumid suurenevad – aga milline on nende komponentide panus ekstreemsetesse veetasemetesse?



Lahutuse tulemus



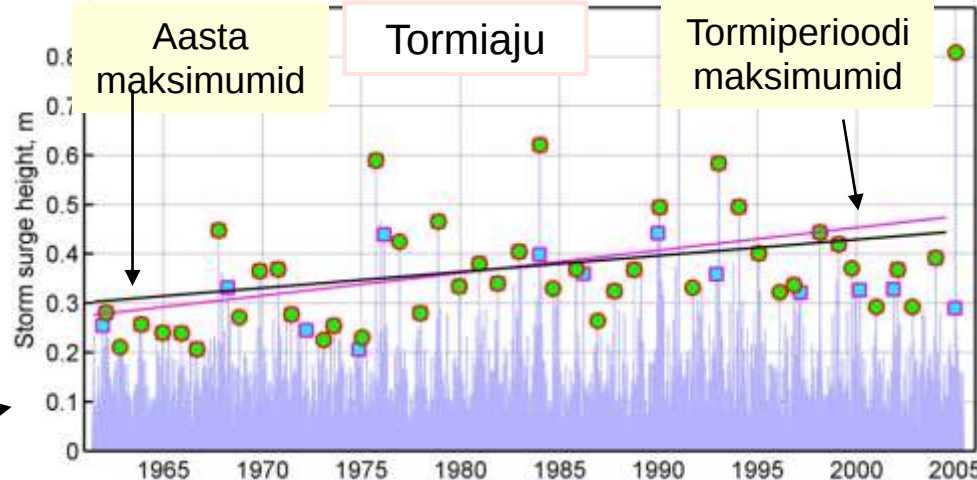
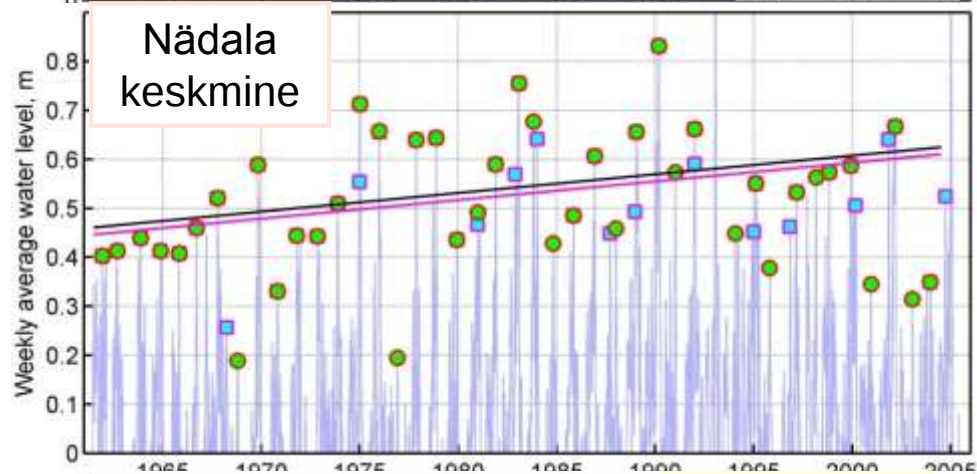
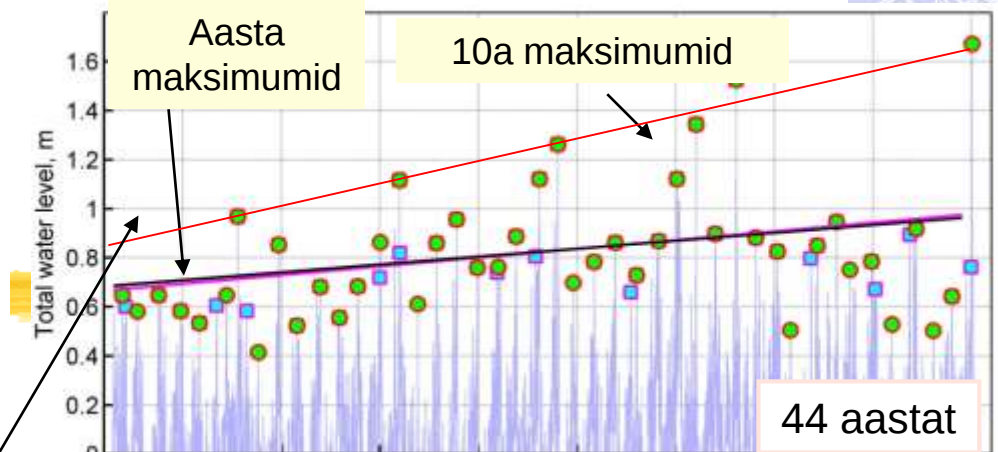
Väga sarnase käitumisega komponendid (amplituud, sesoonne muutlikus, trendid jne)



Ekstreemsete veetasemete osatrendid Tallinnas: võrdsed

(RCO andmestik)

- 10a maksimumide alusel:
20 cm/dekaadis (!?)
- Keskmise ja tormiaju
trendid:
 - põhimõtteliselt sarnased
 - Veidi erinevad tõusud



Meetrid →



Samad trendid Eesti saarte idarannikul: **väga erinevad**

(RCO andmestik)

- Tormiaju maksimumid: trend peaaegu olematu

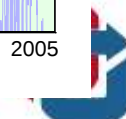
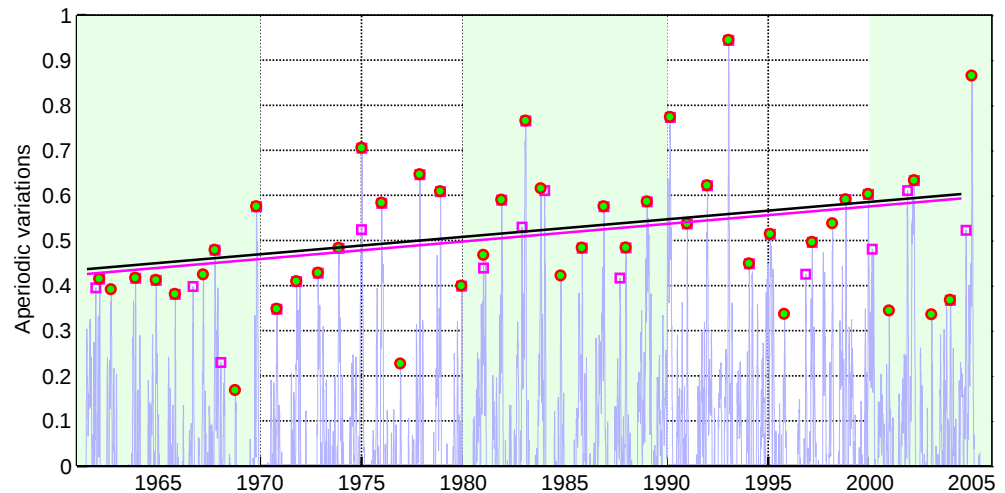
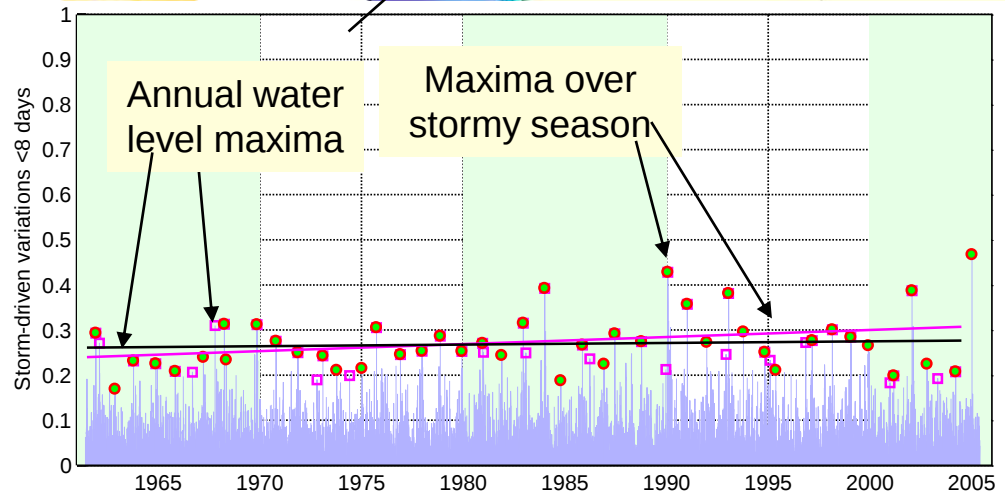
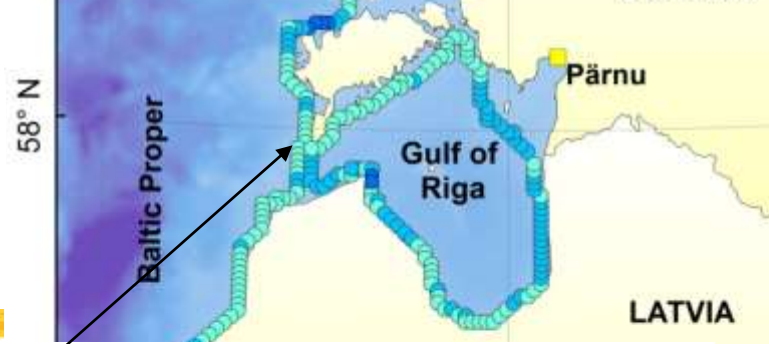
- 0.4 cm/dekaadis (aastane)

- 1.6 cm/dekaadis (tormiperiood)

- Läänemere kui terviku veetase

- 3.9 cm/dekaadis (aastane)

- 3.9 cm/dekaadis (tormiperiood)



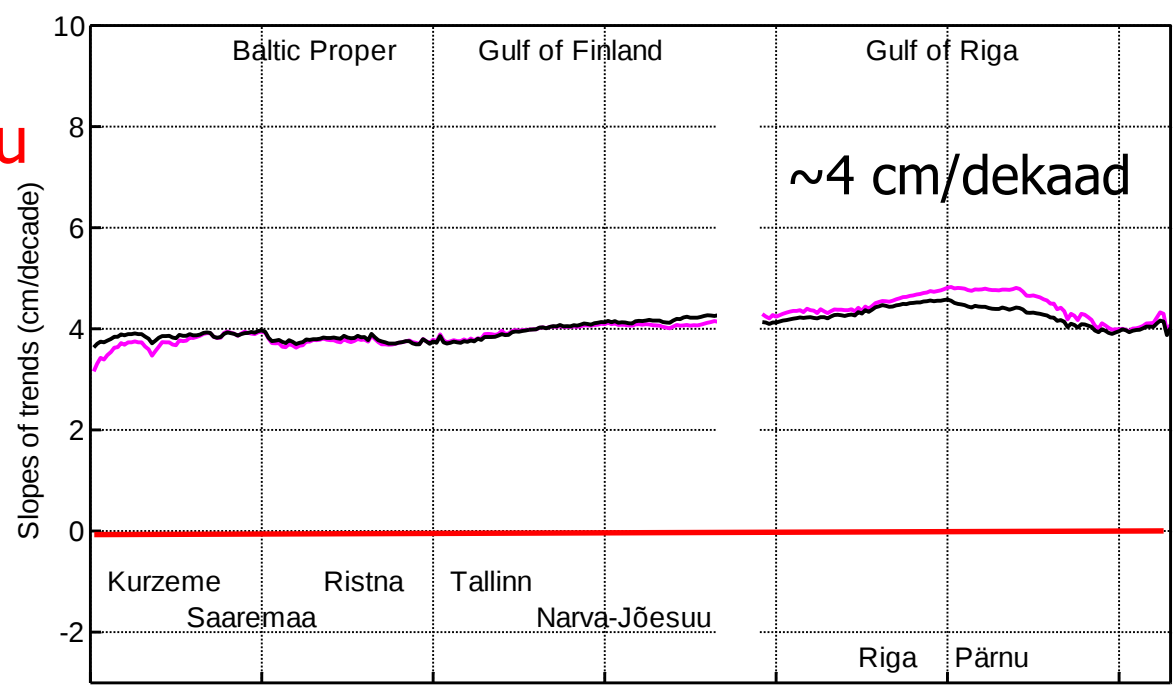
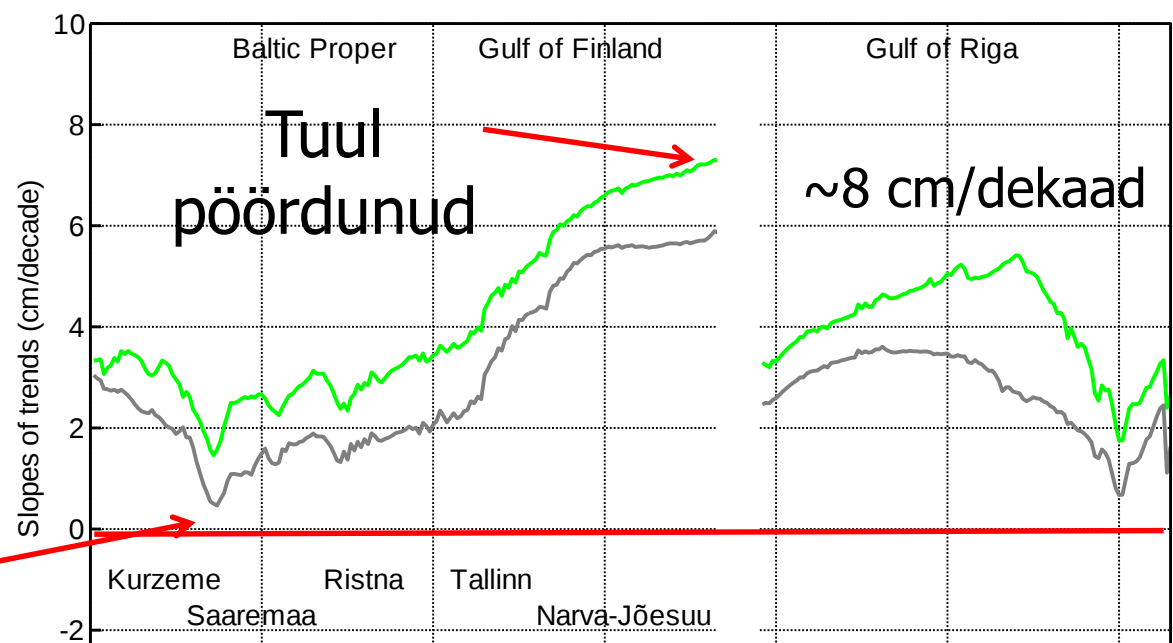
Trendi tõus piki Eesti randa: kõnekaad erinevused

Tormiaju: nullist
[saarte läänerannik]
kuni 8 cm/(10a)
[Soome/Liivi laht]

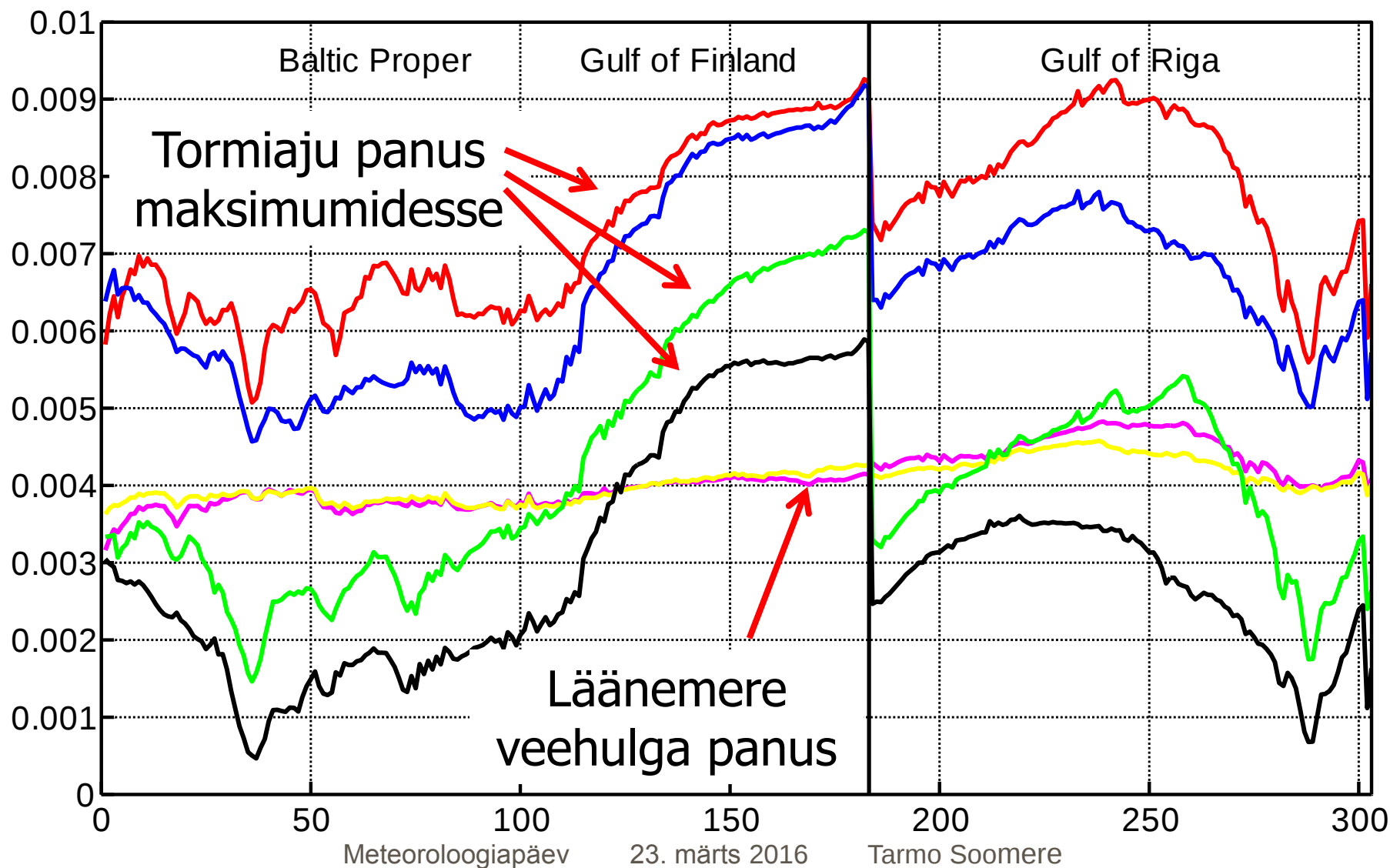
→ Tormid ei ole tugevamad!

8 päeva keskmine (~**kogu Läänemere veetase**):
konstantne trend

→ Tormide seeriad läinud pikemaks!



Värvilised erinevused veetasemete maksimumidesse panustamises



Valik järeldusi:

- Ilm: igapäevane normaalsus
- Kliima: matemaatiline kategooria
- Elame ilmasüsteemi suurte muutuste ajastul
- Meri reageerib kliimamuutustele omal moel
- **Kliimamuutus Läänemere moodi**
 - muutunud mitte tuule kiirus, vaid tuule suund tugevates tormides



Tänan tähelepanu eest!

Dalmaatsia
rannik 2015