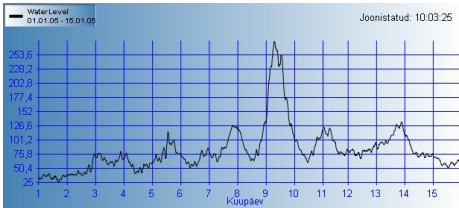


Loeng 7b:

Veetase



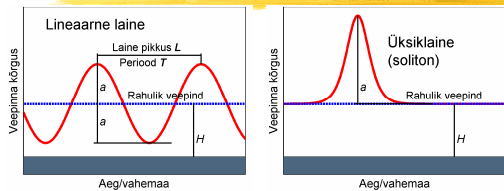
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetase, meretase, water level jne.

- meretase – enim kasutusel
- tähendab veetaset mere teatud punktis kindlal ajahetkel
- Paralleelselt ja samatähenduslikena kasutatakse
 - merevee kõrgus
 - veeseis
 - veetase meres.

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Mis on veetase, kui veepinna asend kogu aeg muutub



Veetase (veeseis) Läänemere tingimustes:

veepinna kõrgus pikaajalise keskmise suhtes, millest on välja filtreeritud tuule- ja ummiklainete mõju

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetase: ajamastaabi küsimus

- Veepinna häiritused kestusega alla mitmekümne minuti: ignoreeritakse
- Pikaajaline keskmine: tegelikult mõeldakse mõnekümne aasta keskmist
- Geoloogilised protsessid (maakoore tõus) enamasti ei loeta veetaseme osaks
- (välja arvatud üksikutes kohtades, näiteks Läänemeres)

Veetase (veeseis) Läänemere tingimustes:

veepinna kõrgus pikaajalise keskmise suhtes, millest on välja filtreeritud tuule- ja ummiklainete mõju

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Kroonlinna null

- Läänemere keskmist veetaset 1825-1840 tähistav rõhtjoon Kroonlinna Obvodnoi kanali kivisilla tugisambal
- NSVL nivelleerimisvõrgu algpunkt – sellest loetakse Venemaal geodeetiliste punktide absoluutkõrgusi maismaal ja absoluutsügavusi Läänemere kaartidel
- Määras ja märkis Michael von Reineke (10.XI.1801 Cesise lähedal – 17.IV.1859 Maini-äärne Frankfurt), baltisaksa päritoluga vene **hüdrograaf**; muu seas koostas mitmed lootsiraamatud Soome lahe, Liivi lahe jne. Kohta – vt Mereleksikon
- Langeb enam-vähem kokku paljuaastase keskmise veetasemega
- Ei ole kasutatav Soomes, kus maa kiiresti kerkib

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Muud süsteemid

- Eestis (suht palju) kasutusel: **Balti Süsteem** = Kroonlinna null + 500cm
- Poola Kroonlinna süsteem (Kroonlinn -3 cm)
- Saksa Kroonlinna süsteem (Kroonlinn -4 cm, Ekman, 1998)
- nende erinevus ~ keskmine merepinna topograafia (Ekman, Mäkinen, 1994)
- Kroonlinna peeli ja Amsterdami mõõdulati nullpunkti erinevuseks: ligikaudu 15 cm (Ihde 1993).

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Läänemeri ja veetase: Eesti ikka laineharjal

- Läänemerele kõige vanem ja enam arenenud alaliste veetaseme mõõtejaamade võrk
- Veetaseme muutuste jälgimine üle kahe ja poole sajandi (Stockholm)
- Esmalt: mõõdulati vaatlused sagedusega mõned korrad nädalas kuni mõned korrad päevas
- Vaatlusi hakati mitmel pool läbi viima juba 19. sajandil, sealhulgas Kroonlinnas, Tallinnas (1805 – 1810, pidevalt 1842 →, Ojaveer *et. al.*, 2000), Stockholmis, Baltiiskis ja Klaipedas

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Läänemeri ja veetase II:

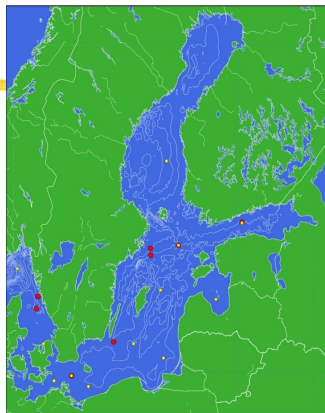
- Mõõdulatile järgnes mareograaf, mis võimaldas merepinna kõikumiste ajas pidevat registreerimist
- Esimene mareograaf paigaldati Swinoujscie / Świnoujście'sse 1869 (tollal Swinemünde).
- Enamasti saadakse tänapäeval mareograafi väljund digitaalkujul.
- Ajavahemikul 1840 - 1950 suurenes meretaseme mõõtejaamade hulk ca 3 korda (Lazarenko, 1961a).
- Viimase paarikümne aasta vältel ei ole mõõtejaamade võrgu tiheduses olulisi muutusi toimunud, pigem on jaamu suletud

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Läänemere mõõtevõrkusid I

Lainetus



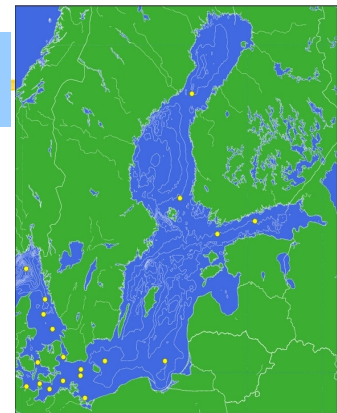
Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Läänemere mõõtevõrkusid II

Vertikaalsed
profiilid -

T, S, O₂, toitained,
klorofüll, hägusus



Soomere 2010

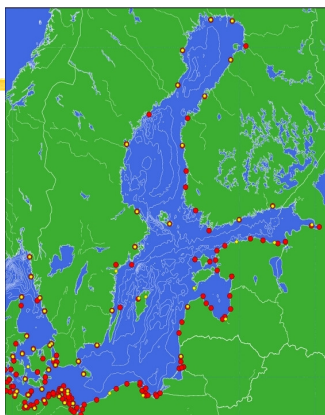
EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme
mõõtevõrk:
konkurentsitu-
tiedaim

Veetase

Enamus andmeid
koondatud
ühtsesse süsteemi
- BOOS

Baltic Operational
Oceanographic
System



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme empiirika

sarnane tuule, lainetuse, jne.
käsitlusele:

- mõõdetakse piisavalt kaua
- analüüsitakse, hinnatakse ja prognoositakse mõõtmistulemuste alusel

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme mõõtmise viise I:

- (i) Veetaseme füüsiline / visuaalne jälgimine
- (ii) Veetaseme mareograaf
- (iii) Veetaseme autonoomsed mõõteseadmed
 - (i) rõhuandur
 - (ii) Mareograaf



(vaata videot)

Veetaseme mõõtmise viise Ia: mõõdulatt

- Venemaa (incl. Eesti): numbrid suurenesid alt üles)
- Rootsi: numbrid suurenesid ülalt alla

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme mõõtmise viise II:

- (i) Veetaseme füüsiline / visuaalne jälgimine
- (ii) Veetaseme (pool)automaatne jälgimine: mareograaf
- (iii) Veetaseme autonoomsed mõõteseadmed
 - (i) rõhuanduril
 - (ii) Mareograafi põhimõttel – veetaseme jälgimine
- (iv) veepinna topograafia satelliidilt (Poseidon, TOPEX)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme mõõtmise jaam



Mehaaniline / Rõhuandur

(põhimõtteliselt sama, mis lainete mõõtmisel, vaid muutused alla mõne minuti on välja filtreeritud)

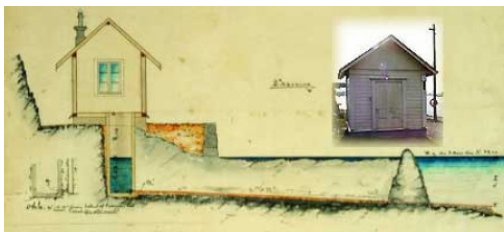
Toru merre

Toimib ühendatud anumate põhimõttel

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme mõõtmise jaam ehk mareograaf - läbilõige



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme mõõtmise viise III:

- (i) Veetaseme füüsiline / visuaalne jälgimine
- (ii) Veetaseme (pool)automaatne jälgimine: mareograaf
- (iii) Veetaseme autonoomsed mõõteseadmed
 - (i) rõhuanduril
 - (ii) Mareograafi põhimõttel – veetaseme jälgimine
- (iv) veepinna topograafia satelliidilt (Poseidon, TOPEX)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

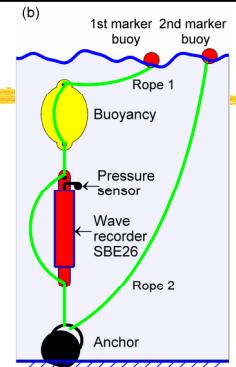
Veetaseme mõõtmise viise IIIa:

- (i) Veetaseme füüsiline / visuaalne jälgimine
- (ii) Veetaseme (pool)automaatne jälgimine: mareograaf
- (iii) Veetaseme automaatne jälgimine: autonoomsed mõõteseadmed
 - (i) rõhuanduril
 - (ii) Mareograafi põhimõttel – veetaseme jälgimine ujuki asendi, juhtivusanduri jne. alusel
- (iv) veepinna topograafia satelliidilt (Poseidon, TOPEX)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Wave Recorder LM2 (PTR Grupp, Eesti)



Veetase = üli-üli-üli...pikk laine → rõhuandur võib olla väga sügaval (nagu tsunami avastamise süsteemis)

Veetaseme mõõtmise viise IIIb:

- (i) Veetaseme füüsiline / visuaalne jälgimine
- (ii) Veetaseme (pool)automaatne jälgimine: mareograaf
- (iii) Veetaseme automaatne jälgimine: autonoomsed mõõteseadmed
 - (i) rõhuanduril
 - (ii) Mareograafi põhimõttel – veetaseme jälgimine ujuki asendi, juhtivusanduri jne. alusel – nagu klassikalises jaamas
- (iv) veepinna topograafia satelliidilt (Poseidon, TOPEX)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme mõõtmise viise IV:

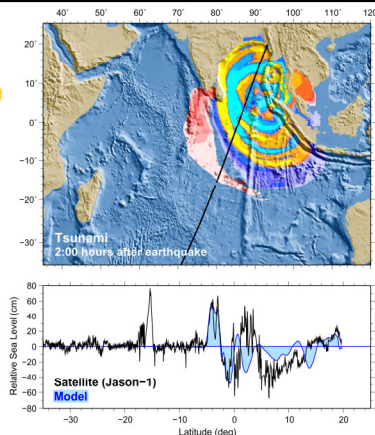
- (i) Veetaseme füüsiline / visuaalne jälgimine
- (ii) Veetaseme (pool)automaatne jälgimine: mareograaf
- (iii) Veetaseme automaatne jälgimine: autonoomsed mõõteseadmed
 - (i) rõhuanduril
 - (ii) Mareograafi põhimõttel – veetaseme jälgimine ujuki asendi, juhtivusanduri jne. alusel – nagu klassikalises jaamas
- (iv) veepinna topograafia satelliidilt (TOPEX/Poseidon, Jason seeria)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

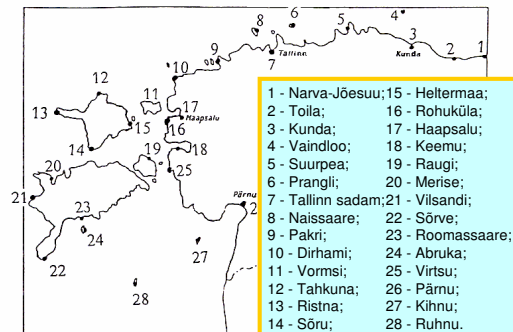
Indian Ocean tsunami

(the first satellite-measured global tsunami)

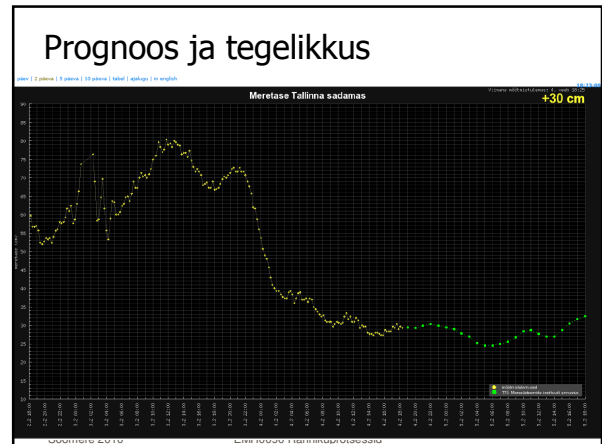
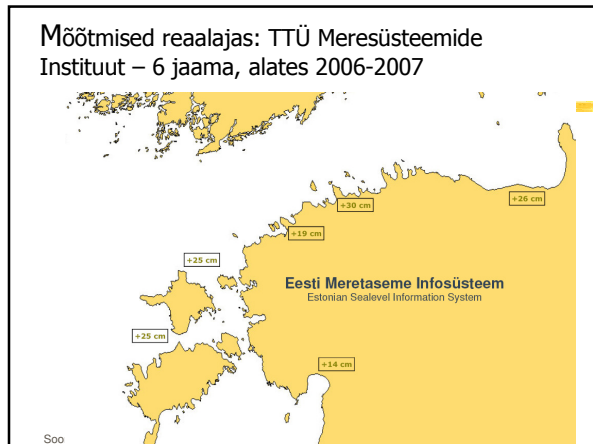


Soomere 2010

Veetaseme mõõtmine Eestis

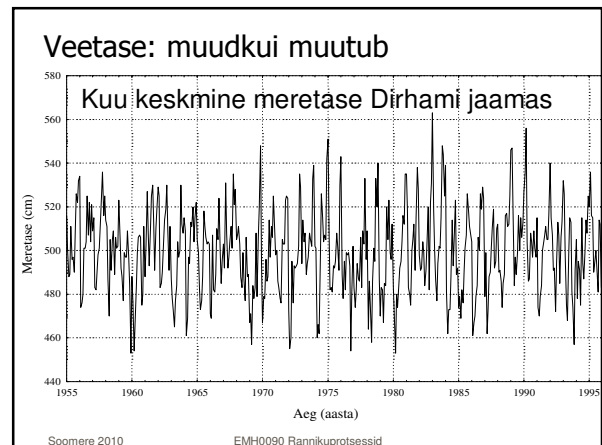


5

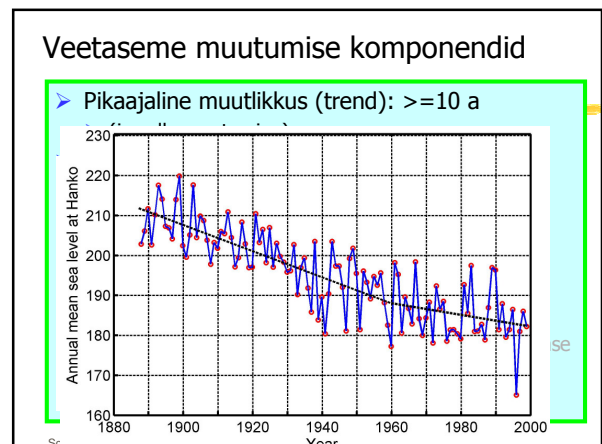


Mida mõõdetud andmetega pihta hakata?

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid



- ### Veetaseme muutumise komponendid
- Pikaajaline muutlikkus (trend): ≥ 10 a
 - (ja selle muutumine)
 - (Kvaasi)perioodiline muutlikkus
 - perioodid $\frac{1}{2}$ päeva – [10] aastat
 - (kvaasi)perioodilise muutlikkuse struktuur
 - aastane käik
 - tõusu-mõõna amplituudide regulaarne muutumine
 - ekstreemsed kõrg- ja madalvee seisud
 - ekstreemsed väärtused, nende statistika, ekstreemse veeseisu kestvus, korduvus jne.
 - lühiajalise muutlikkuse muutumine
- Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid



Veetaseme muutumise komponendid

- Pikaajaline muutlikkus (trend): ≥ 10 a
➤ (ja selle muutumine)

Johansson, Boman, Kahma, Launiainen:
Trends in sea level variability in the Baltic Sea,
Boreal Environment Research **6**, 159-179

Lk. 175, joonis 9

Peegeldab pikaajalisi protsesse:

- Maakoore tõus / vajumine
- Ookeani veetaseme tõus / langemine
- Tuulte struktuuri muutumine (Läänemere!!!)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

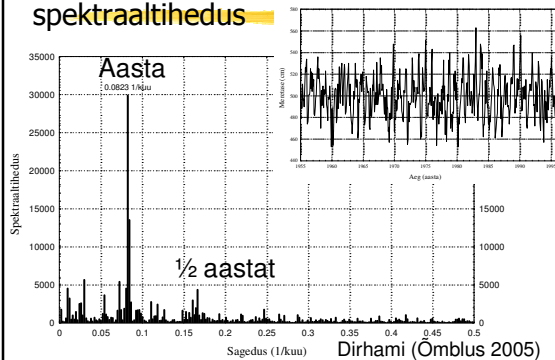
Veetaseme muutumise komponendid

- Pikaajaline muutlikkus (trend): ≥ 10 a
➤ (ja selle muutumine)
- (Kvaasi)perioodiline muutlikkus
➤ perioodid $\frac{1}{2}$ päeva – [10] aastat
- (kvaasi)perioodilise muutlikkuse struktuur
➤ aastane käik
➤ tõusu-mõõna amplituudide regulaarne muutumine
- ekstreemsed kõrg- ja madalveeseisud
➤ ekstreemsed väärtused, nende statistika, ekstreemse veeseisu kestvus, korduvus jne.
- lühiajalise muutlikkuse muutumine

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme perioodilised muutused: spektraalanalüüsi lihtne rakendus - spektraaltihedus



Veetaseme perioodilisi komponente Eestis ehk spektraalanalüüsi lihtne rakendus

- Andmestik 21 - 50 aastat: aastane muutlikkus eristub tunduvalt selgemalt.
- Aastase muutlikkuse amplituud jääb vahemikku 6 - 17 cm.
 - Ristna ja Kihnu 15 cm, Haapsalu 14 cm, Kunda, Rohuküla ja Dirhami 13 cm, Heltermaa 12 cm ning Vaindloo ja Vormsi - 11 cm.
- Lisaks aastasele muutlikkusele on enamikel juhtudel selgemini eristatavad kuuekuulise ja peaaegu kolmeaastase perioodiga piigid.
- Ajaliselt ulatuselt 50 aastat ületavates andmestikes eristuvad kõige puhtamalt perioodid üks aasta ja kuus kuud.
 - Aastase muutlikkuse amplituud: Tallinn 17 cm, Pärnu 16 cm, Narva-Jõesuu ja Ruhnu 15 cm, Suurpea 14 cm, Vilsandi, Sõrve ja Virtsu 13 cm, Pakri 12 cm ning Tahkuna 11 cm.
- Narva-Jõesuu, Vaindloo, Tallinna, Dirhami, Tahkuna, Ristna, Heltermaa, Vilsandi ja Sõrve jaamas on selgelt eristatav 1/2aastane perioodilisus

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme perioodilisi komponente Eestis ehk spektraalanalüüsi lihtne rakendus

(Anu Ömblus, magistritöö 2005, Tartu Ülikool)

- **Domineerib aastase perioodiga muutlikkus**
- Ainus erand: Toila (perioodid 6 kuud ja ~19 kuud); põhjused: lühike aegrida, liiga palju jääd:
- Jaamades, kus andmestik lühike (5-18 aastat), avalduvad vahel muud perioodid
 - Prangli: aastane muutlikkus amplituudiga 9 cm ning muutlikkus perioodiga 3 aastat 7 cm amplituudiga
 - Naissaar: aastane muutlikkus 11 cm, 3-aastane muutlikkus amplituudiga 8 cm ning nelja- ja kuuekuuline muutlikkus 7 cm
 - Roomassaare: aastane muutlikkus amplituudiga 7 cm, lisaks 37-kuuline periood.

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme aastase muutlikkuse varasemad hinnagud:

- Kõuts *et al.* (1995): aastase muutlikkuse amplituud 16x Eesti + 3x Läti jaama: 20 cm.
- Erinevus eri aastate vahel -- kuni 8 cm.
- Aastase harmooniku amplituud 20 cm ka Raudsepp *et al.* (1999) 20x Eesti mõõtejaamas.
- Mõlemas nimetatud töös vaadeldi vaid viie aasta pikkust andmestikku.
- Ömblus (2005): kõik olemasolevad andmed, sh paljud üle 50 aasta pikkused
- Ömblus (2005): aastase muutlikkuse amplituud kuni 18 cm.

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Kes naabritest on parem ehk milliseid (kvaasi) perioodilisi muutusi märkavad põhjanaabrid

- Soome rannikul tavaline: muutlikkus perioodiga **kuus kuud** - aastase muutlikkuse esimene harmoonik. Soome ranniku piirkonnas pole märgatavaid Kaskineni, Raabe ja Oulu jaamas.
 - Avaldub pikemates andmestikes; Eestis ei avaldu vaid: Suurpea ja Haapsalu
- Soome rannikul avaldub vahel **Chandleri piik** perioodiga **14,3 kuud**
 - Eesti andmete puhul võib Chandleri piigi avaldumist kahtlustada Ristna, Dirhami ja Ruhnu jaamas. Kindel on see Pärnu jaamas.
- Soome andmetes: muutlikkus perioodiga **2,7 aastat** (Vermeer *et. al.*, 1988).
 - Eestis mitte igal pool - põhjuseks Eesti aegridade vähene ajaline ulatus, kokkulangevus Soome andmetega Dirhami, Heltermaa, Pärnu ja Kihnu jaamas.
- Soome andmetes **6,4 aastat** (Vermeer *et. al.*, 1988)
 - Eestis analoogilise perioodiga muutlikkust ei leitud
- Ka Soome autorid pole leidnud selle füüsikalisi põhjuseid

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

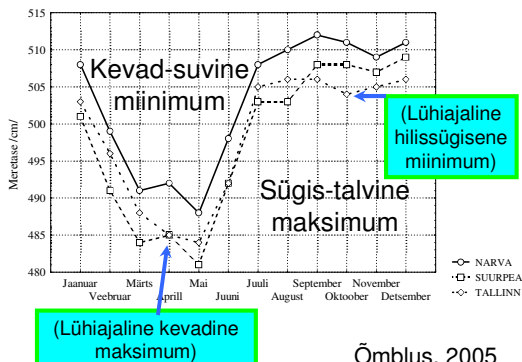
Veetaseme muutumise komponendid

- Pikaajaline muutlikkus (trend): ≥ 10 a
 - (ja selle muutumine)
- (Kvaasi)perioodiline muutlikkus
 - perioodid $\frac{1}{2}$ päeva – [10] aastat
- (kvaasi)perioodilise muutlikkuse struktuur
 - aastane käik
 - tõusu-mõõna amplituudide regulaarne muutumine
- ekstreemsed kõrg- ja madalveeseisud
 - ekstreemsed väärtused, nende statistika, ekstreemse veeseisu kestvus, korduvus jne.
- lühiajalise muutlikkuse muutumine

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

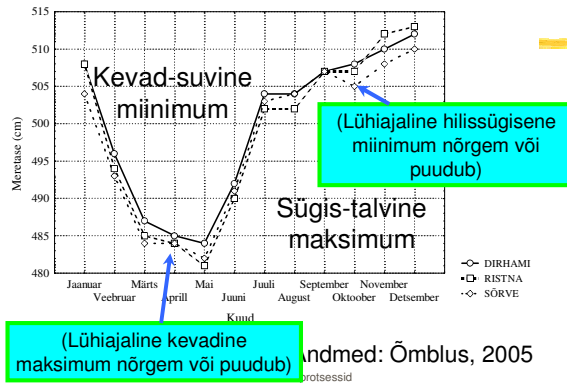
Veetaseme aastane käik Soome lahes



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

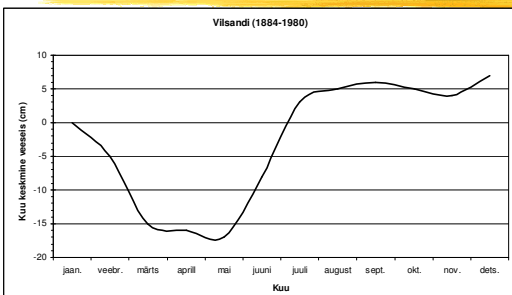
Veetaseme aastane käik avamerel



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme tüüpiline käik Eestis



Soomere 2010

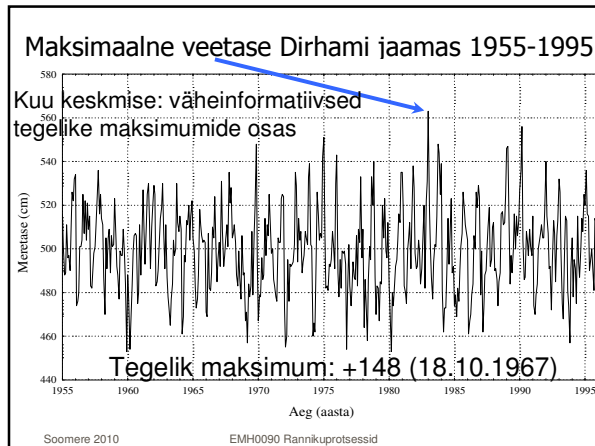
EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme muutumise komponendid

- Pikaajaline muutlikkus (trend): ≥ 10 a
 - (ja selle muutumine)
- (Kvaasi)perioodiline muutlikkus
 - perioodid $\frac{1}{2}$ päeva – [10] aastat
- (kvaasi)perioodilise muutlikkuse struktuur
 - aastane käik
 - tõusu-mõõna amplituudide regulaarne muutumine
- ekstreemsed kõrg- ja madalveeseisud
 - ekstreemsed väärtused, nende statistika, ekstreemse veeseisu kestvus, korduvus jne.
- lühiajalise muutlikkuse muutumine

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid



Kõrge & madala ebasümmeetria Eestis

- Kõrge veetase – lühike sündmus (~mõni tund): äkiline veetõus, kiire langus
- Esineb läänekaare tuultega (sügiseti)
- Madal veetase – pikaajaline seisund (~mõni päev): aeglane langus, aeglane tõus
- Esineb idakaare tuultega (kevad/suviti)
- Sesonone kõikumine näha vaid kuu keskmistes – lühiajalised kõikumised on palju suuremad

Veetase järgib atmosfäärirõhu & tuuletingimuste sesoonset käitumist + mere geometriat

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Gudrun: kulukas külaline

Jaauaritorm oli üks kulukamaid

Läänemere mäd, sealhulgas Eesti, mulhi talvel rüüstid torm tekitas kahju 1,9 miljardi dollari ulatuses, teatab kindlustuskompanii Swiss Re uuring. Eesti kroonides ulatus kahju 24 miljardini. Selle saavutusega paigutus Saksamaal Erwini ja Nortas Gudrun nime kandnud torm mõeldumud aaria suuremate kindlustusjuhtu-

mitte edetabelis Euroopas esikohale ning üleilmnes arvestuses neljandale kohale. Uurangu kohaselt tekitasid katastroofid mulhi kahju 230 miljardi dollari ulatuses, millest kolmandik oli kaetud kindlustusega. Kulukaim kindlustusjuhtum oli USA-d ja teisi Mehhiko lahe äärsi riike tabanud torm Katrina.

Kõige kulukamad kindlustusjuhtumid 2005

sündmus	algus	riigid	kahju, mln USD	ohvreid
orkaan Katrina, üleujutused, tammide ja naftatööstuse purustused	24. august	USA, Bahama, Mehhiko lahe riigid	45 000	1326
orkaan Rita, üleujutused, naftatööstuse purustused	20. september	USA, Kuuba, Mehhiko lahe riigid	10 000	34
orkaan Wilma, paduvihm, üleujutused	16. oktoober	USA, Mehhiko, Haiti, Kuuba	10 000	35
talvetorm Erwin, üleujutused	8. jaanuar	Eesti, Rootsi, Taani, Läti jt	1887	18
vihm, üleujutused ja maalihked	19. august	Šveits, Saksamaa jt maad	1864	49
orkaan Dennis, kahju põllumajandusele	6. juuli	USA, Kuuba, Haiti, Jamaica jt maad	1115	55

allikas: Swiss Re

Soomere 2010 EESTI EKSPRESS 10 (848) 9. märts 2006

Gudrun: mõjukas külaline

Cyclone Gudrun in January 2005 and modelling its hydrodynamic consequences in the Estonian coastal waters,

Ülo Suursaar, Tiit Kullas, Mikk Otsmann, Ivo Saaremäe, Juta Kuik and Merike Merilain,

Boreal Environment Research 2006

Table 2. The maximum sea levels measured at Estonian tide gauge stations during and prior Gudrun. In Haapsalu and Virtsu, estimations based on subsequent levelling of water markings were performed; in some stations measurements were impossible due to waves or flooding. * - stations with episodic post-measurements.

Station	Highest prior 2005	09.01.2005 maximum
Narva-Jõesuu	202 23.09.1924	194 (08.00 GMT)
Toila	155 11.01.1991	160 (06.00 GMT)
Kunda	157 06.01.1975	139 (12.00 GMT)
Loksa	140 18.10.1967	
Port of Tallinn	135 15.11.2001	152 (06.00 GMT)
Dirhami	148 18.10.1967	134 (06.00 GMT)
Haapsalu*	150 26.12.1951	197 (estimated)
Rohuküla	160 18.10.1967	
Virtsu	150 18.10.1967	160 (estimated)
Heltermaa	148 18.10.1967	146 (00.00 GMT)
Pärnu	253 18.10.1967	275 (05.00 GMT)
Kihnu*	152 02.11.1969	
Ruhnu*	145 18.10.1967	
Ristna	170 26.01.1990	207 (04.00 GMT)
Vilsandi*	206 18.10.1967	

Soomere 2010 E

Gudrun: mõjukas külaline II

Narva-Jõesuu	202	23.09.1924	194 (08.00 GMT)
Toila	155	11.01.1991	160 (06.00 GMT)
Kunda	157	06.01.1975	139 (12.00 GMT)
Loksa	140	18.10.1967	
Port of Tallinn	135	15.11.2001	152 (06.00 GMT)
Dirhami	148	18.10.1967	134 (06.00 GMT)
Haapsalu*	150	26.12.1951	197 (estimated)
Rohuküla	160	18.10.1967	

Suursaar et al., Boreal Environment Research 2006

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Gudrun: mõjukas külaline III

Rohuküla	160	18.10.1967	
Virtsu	150	18.10.1967	160 (estimated)
Heltermaa	148	18.10.1967	146 (00.00 GMT)
Pärnu	253	18.10.1967	275 (05.00 GMT)
Kihnu*	152	02.11.1969	
Ruhnu*	145	18.10.1967	
Ristna	170	26.01.1990	207 (04.00 GMT)
Vilsandi*	206	18.10.1967	

Suursaar et al., Boreal Environment Research 2006

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme muutumise komponendid

- Pikaajaline muutlikkus (trend): ≥ 10 a
 - (ja selle muutumine)
- (Kvaasi)perioodiline muutlikkus
 - perioodid $\frac{1}{2}$ päeva – [10] aastat
- (kvaasi)perioodilise muutlikkuse struktuur
 - aastane käik
 - tõusu-mõõna amplituudide regulaarne muutumine
- ekstreemsed kõrg- ja madalveeseisud
 - ekstreemsed väärtused, nende statistika, ekstreemse veeseisu kestvus, korduvus jne.
- lühiajalise muutlikkuse muutumine

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Lühiajaline muutlikkus: ka selle omadused muutuvad ajas

Johansson, Boman, Kahma, Launiainen:
Trends in sea level variability in the Baltic Sea,
Boreal Environment Research **6**, 159-179

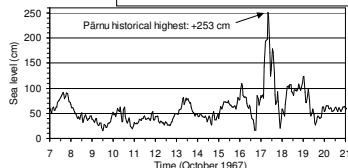
Lk. 173, joonis 8

Läänemeres peegeldab tuule omaduste muutusi:

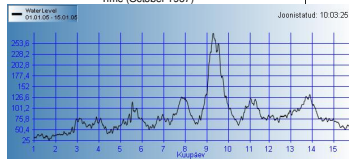
- tormid ebatavalisest suunast
- tormid ebatavalise kestvusega
- = tuulte struktuuri muutumine
- väljendub näiteks ekstreemsete olude kestvuse muutumises

Mille poolest veetõus jaanuaritormis eriline?

Suursaar, Ü., Kullas, T., Otmann, M. Kõuts, T. 2002. A model for storm surge forecasts in the Eastern Baltic Sea. In: Risk Analysis III. Computer simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation (C.A. Brebbia, editor), WIT Press, Southampton, Boston pp. 509-519.



Ajaline kestus:
1967 ~ laine 1-2 tundi
2005 ~ üleujutus 10 tundi



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme dünaamika

(ehk veetaseme muutuste põhjused)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme muutuste põhjuste klassifikatsioon I

Klassika: Nomitsu, Okamoto, 1927

- (i) Internsed põhjused (merevee omaduste muutumine)
 - (i) Incl. sademed, aurustumine, jõgede sissevool
- (ii) Eksternsed põhjused
 - (i) atmosfääri mõju (tuul, õhurõhk jne.)

Ignoreeritud selles kontekstis: astronoomilised faktorid (tõus-mõõn) ja tsunami

Nomitsu, T., Okamoto, M., 1927. The causes of the annual variation of the mean sea level along the Japanese coast. *Mem. Coll. Sci. Kyoto Univ.*, A, 10:125-161.

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme muutuste põhjuste klassifikatsioon II: Läänemere tingimused

Kohalik klassika: Hela 1944

- (i) Internsed põhjused
 - (i) temperatuur
 - (ii) soolsus
- (ii) Eksternsed põhjused
 - (i) Looded
 - (ii) meteoroloogiliselt määratud loodusjõud (õhurõhk, tuuled, seišid, sademed, aurustumine, magevee sissevool, veevahetus läbi Taani väinade)

Hela, I., 1944. Über die Schwankungen des Wasserstandes in der Ostsee mit besonderer Berücksichtigung des Wasseraustausches durch die dänischen Gewässer. *Merentutkimuslaitoksen Julkaisu-Havstforskningsinstitutets Skrift*, 134: 108 pp.

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme muutuste põhjuste klassifikatsioon III: uuemad klassikud

- (i) **Dietrich (1954)**
(maakoore mõju eraldi)
- (ii) **Galerkin (1960, Jaapani meri)**
 - (i) Vee tihedus, (ii) vee bilanss, (iii) veetaseme ruumiline ebaühtlus (tuuled, seishid jne.)
- (iii) **Jensen (1998)**
 - (i) Looded
 - (ii) Meteo-, geo-, okeanograafilised tegurid
 - (iii) Maakoore vertikaalsed liikumised
 - (iv) Eustaatiline veetaseme muutus

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetase konkreetses kohas & ajal:

- Maakoore vertikaalne liikumine
- astronoomilised faktorid - looded;
- okeanograafilised faktorid - vee tihedus ja hoovused;
- hüdroloogilised faktorid - jõgede vooluhulk;
- eustaatilised faktorid - jää sulamine polaaraladel;
- tehnilised faktorid - vead mõõteaparatuuriga või mõõtetulemustega opereerimisel, vertikaalsed liikumised mõõtejaama vundamendis.
- meteoroloogilised faktorid - õhurõhk, tuul, sademed, aurustumine;

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Läänemere põhjaosa: enamasti maakoore kerkib

Noticeable crustal movements in Estonia northern Europe (fig.1).

On pigem juhused, et maakoore tõus on Kroonlinna kandis üsna tagasihoidlik ning „null“ enam-vähem paigal püsinud.

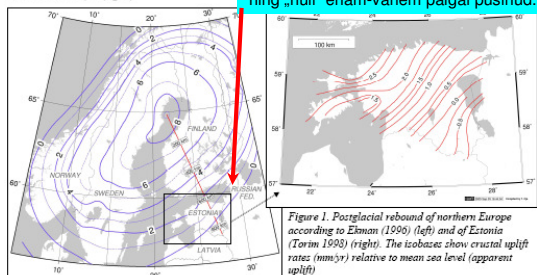


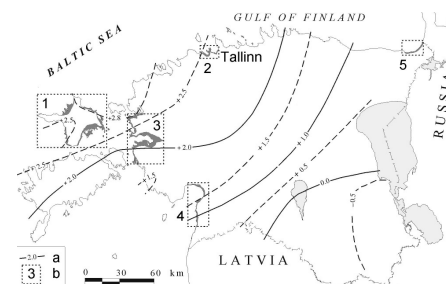
Figure 1. Postglacial rebound of northern Europe according to Ekman (1996) (left) and of Estonia (Torim 1998) (right). The isobars show crustal uplift rates (mm/yr) relative to mean sea level (apparent uplift).

Ekman, M. (1996) A consistent map of the postglacial uplift of Fennoscandia. Terra Nova, 8, 158-165
Torim, A. (1998) Renovation of the Estonian Levelling Network. Estonian Land Board, Development Centre (unpublished report)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Eesti: maa tõuseb (mm/aaastas)



Kaart: Suursaar et al., 2004

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

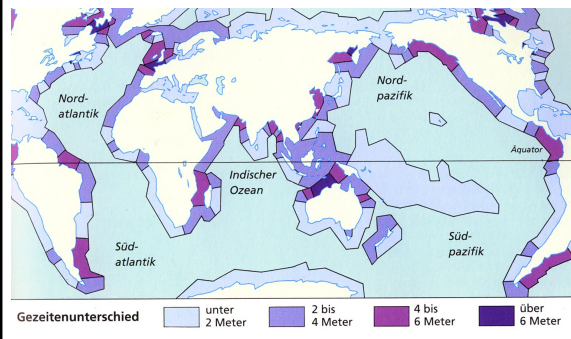
Veetase konkreetses kohas & ajal:

- Maakoore vertikaalne liikumine
- astronoomilised faktorid - looded;
- okeanograafilised faktorid - vee tihedus ja hoovused;
- hüdroloogilised faktorid - jõgede vooluhulk;
- eustaatilised faktorid - jää sulamine polaaraladel;
- tehnilised faktorid - vead mõõteaparatuuriga või mõõtetulemustega opereerimisel, vertikaalsed liikumised mõõtejaama vundamendis.
- meteoroloogilised faktorid - õhurõhk, tuul, sademed, aurustumine;

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Tõusu-mõõna kõrgus (=amplituud?)



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Tõusu-mõõna kõrgus (=amplituud?)

- ☞ Atlandi rannikul: veetaseme muutumine kuni 10 m
- ☞ Läänemeres: mõned cm; väga üksikutes kohtades (kitsad lahed) kuni 10cm

Der höchste Tidenhub

Bay of Fundy (Kanada)	21,00 m
Frobisher Bay (Kanada)	17,40 m
Mündungsgebiet des Severn (Großbritannien)	16,80 m
Granville (Frankreich)	16,10 m
Mündungsgebiet des Majn (Ostrußland)	14,70 m
Golf von Kalifornien (Mexiko)	12,30 m

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetase konkreetses kohas & ajal:

- Maakoore vertikaalne liikumine
- astronoomilised faktorid - looded;
- okeanograafilised faktorid - vee tihedus ja hoovused (→ up/downwelling; ruumiline jaotus)
- Ülesanne 1: Arvutada ookeani pinna tõus juhul, kui vee temperatuur tõuseb 1 kraadi võrra (vee ruumpaisumistegur on 20 kraadi puhul 0.0003 1/kraadi)
- Ülesanne 2: Leida veetaseme erinevus 6%% ja mageda vee vahel 50 m sügavusel merealal, kui 6%% puhul vee erikaal on 1,004.

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetase konkreetses kohas & ajal:

- Maakoore vertikaalne liikumine
- astronoomilised faktorid - looded;
- okeanograafilised faktorid - vee tihedus ja hoovused;
- hüdrooloogilised faktorid - jõgede vooluhulk;
- eustaatilised faktorid - jää sulamine polaaraladel;
- Ülesanne 1: Arvutada ookeani pinna tõus juhul, kui Gröönimaa jääkilp peaks
- Ülesanne 2: Arvutada ookeani pinna tõus juhuks, Arktika merejää täielikult sulaks

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

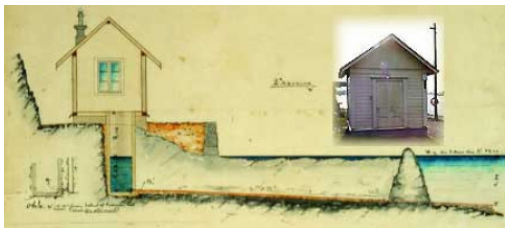
Veetase konkreetses kohas & ajal:

- Maakoore vertikaalne liikumine
- astronoomilised faktorid - looded;
- okeanograafilised faktorid - vee tihedus ja hoovused;
- hüdrooloogilised faktorid - jõgede vooluhulk;
- eustaatilised faktorid - jää sulamine polaaraladel;
- tehnilised faktorid - vead mõõteaparatuuriga või mõõtetulemustega opereerimisel, vertikaalsed liikumised mõõtejaama vundamendis.
- meteoroloogilised faktorid - õhurõhk, tuul, sademed, aurustumine;

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Mareograafid: tundlikud
(i) toru ummistumise suhtes,
(ii) jääkuhjatiste suhtes, mis tekivad mareograafist mere pool



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Probleem Hanko mareograafiga alates 2000 (Johansson et al., BER 2001)

Veetase tugevate vihmadega kõrgem kui merel



Veetase konkreetses kohas & ajal:

- Maakoore vertikaalne liikumine
- astronoomilised faktorid - looded;
- okeanograafilised faktorid - vee tihedus ja hoovused;
- hüdrooloogilised faktorid - jõgede vooluhulk;
- eustaatilised faktorid - jää sulamine polaaraladel;
- tehnilised faktorid - vead mõõteaparatuuriga või mõõtetulemustega opereerimisel, vertikaalsed liikumised mõõtejaama vundamendis.
- meteoroloogilised faktorid - õhurõhk, tuul, sademed, aurustumine;

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Mis mõjutab veetaset kui maakoore liikumised ja ookeani veetaseme muutumine välja jätta

Otseselt

- Õhurõhk
- Tuule ping
- Väga pikad lained (tõus-mõõn, mere omavõnkumised)

Kaudselt

- Tormilained, tõstes veetaset murdlaine võõndist ranna pool (wave set-up)
- Tsüklonite liikumine, mis tekitab pikki laineid
- Tuule muster, mis võib võimendada mere omavõnkumisi
- Ranna geometria

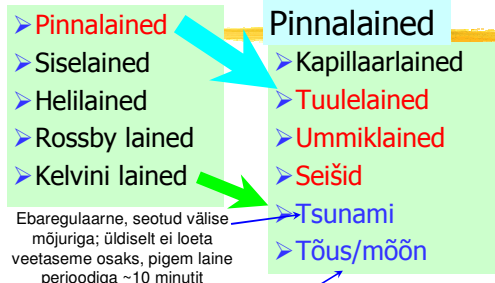
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Tsunami & veetaseme & tormilainete füüsika: sarnasus ja erinevus

- Eksisteerib veepind – piir kahe 1000x erineva tihedusega ~pideva keskkonna vahel
- Võimalik laineline liikumine – signaali / energia levik
- "Vedru" – gravitatsioonijõud
- Erinevad signaallikid:
 - maakoore liikumine
 - Tuul(→ horisontaalkiirus) + õhurõhk + olemasolev veeseis+ranniku geometria
 - Tuul(→vertikaalkiirus)
 - ?mittelineaarsus
- Erinev **ajamastaap**

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

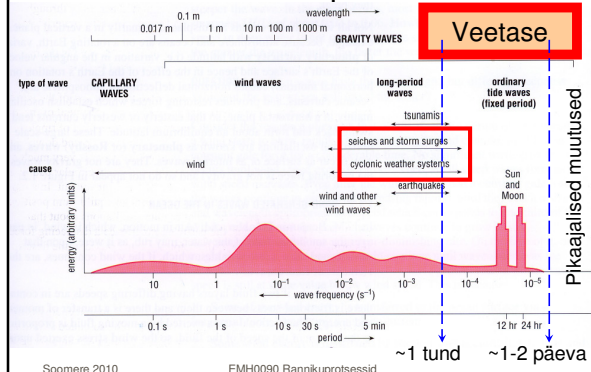
Millised lained mõjutavad veetaset?



Täiesti regulaarne; et aga amplituud muutub ajas, siis sageli loetakse veetaseme osaks ning antakse prognoos näiteks **maksimalse tõusu nivoos**

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Meres on palju laineid, aga veetaset muudavad otseselt vaid pikimad



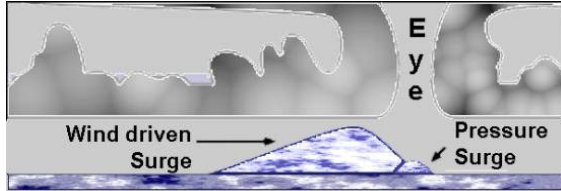
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Tormiaju: mitme komponendi koosmõju

- Baromeetriline tõus
- Ajulaine: tuulepinge mõju veepinnale
 - horisontaalne merepõhi
 - kaldus merepõhi
- Coriolise jõu mõju tormiajule
- Liikuvad õhurõhu häirituse tekitatud pikad lained (Kelvini lained, meteoroloogilised tsunamid jne.)
- Veetaseme muutumine murdlainete võõndis(wave setup)
- (Basseini omavõnkumised – seišid)

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Ajulaine: tormi pool koos hoitav veekuhi

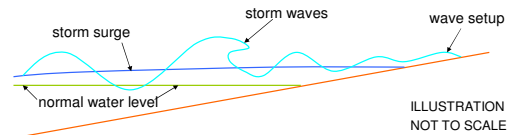
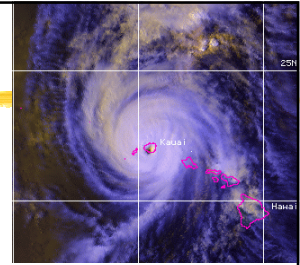


Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Ocean Processes due to Hurricanes

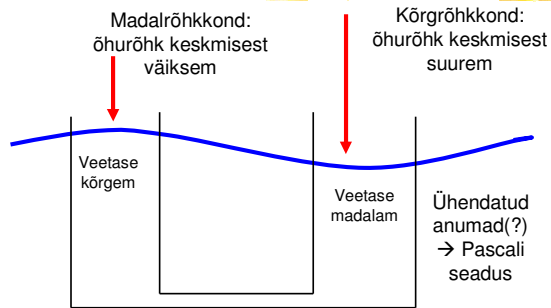
- **Storm surge**
Dome of water due to pressure drop (barometric tides + wind setup)
- **Storm waves**
10 – 16 sec waves generated by wind shear stress
- **Wave breaking**
Wave setup in coastal area



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

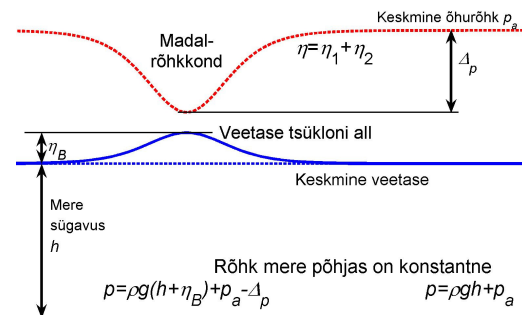
Meri kui baromeeter



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Rõhu tasakaal



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme muutused rõhkkondade all

- 1 mm Hg ~ 1.35 cm veesammast (vastavalt tiheduste suhtele)
- 1 millibaar (/HPa?) = 1 mm veesammast (baar = ??, HPa = ?)
- Toru "ühendatud anumate" vahel:
 - Avaookeanis: kogu veemass
 - Poolsuletud meredes: väinad

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Veetaseme muutus vastavalt rõhkkondade kujunemisele & liikumisele

Avaookeanis

- "Toru" = kogu mere veemass
- läbilaskevõime piiratud ainult lainelevi kiirusega
- (Anti)Tsüklonid levivad aeglasemalt kui pikad lained sügavas meres
- Seega veetaseme muutused ~ õhurõhu muutused & lainelevi kiirus

Läänemere/Põhjameri vahel:

- Taani väinad
- Veetaseme muutused vaid sedavõrd, kui väinad seal vett läbi pääseb

Liivi lahe/Läänemere vahel:

- Irbe väin + Väinameri
- Veetaseme muutused dikteeritud läbipääsuga mitmest väinast
- Mitu basseini → võimalikud võnkumised basseinate vahel

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Madal rõhk Gudrunis



958 hPa tavalise 1013 asemel → veetase 45 cm kõrgem

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

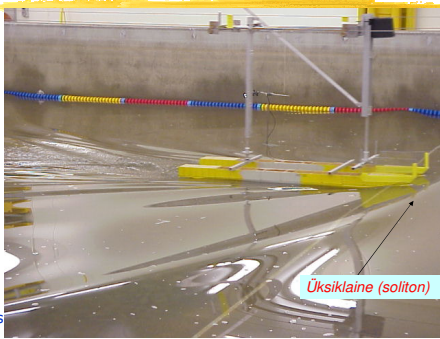
Kui rõhkkond liigub või muutub

- Väga kiiresti: laine ei jõua järgi, ja käitub nagu käituks tõusu-mõõnalaine
- Väga aeglaselt: laine käib perfektselt kaasas
- Pika laine faasikiirusega: (üksik)laine võimendub
- (Ookeanis enamasti võimatu, Läänemeres & Šelfimeredel tavaline → squall line surge, vt. Dean ja Dalrymple, Coastal processes)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Laev või madalrõhkkond: pole vahet

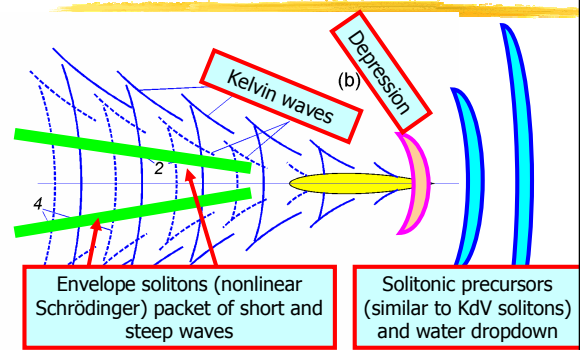


By Andrew Forbes

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Laevalained: solitonid ees, muud lained kõrval/taga



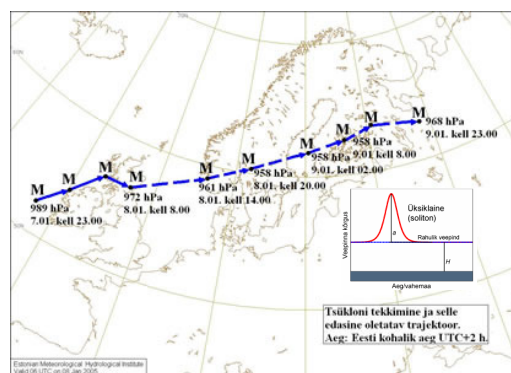
Rõhkkond tekitab kõrge üksiklaine, kui

- Vesi on suhteliselt madal, nii et \sqrt{gH} ~ tsükloni liikumise kiirus (mitte tuule kiirus!!!)
- Tsüklon liigub mööda enam-vähem sirget trajektoori (nagu laev)
- Tsüklon liigub piki randa või mööda piklikku merd
- (suhteliselt haruldane, kuid võimalik)

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Gudruni teekond



Estonian Meteorological Hydrological Institute
Lugemise ajavahemik: 01.08.2005 - 01.09.2005
©SOOMERE 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Liikuv õhurõhu häiritus

$p_0 = f(Ut - x)$ rõhkkond

Keskmine õhurõhk p_0

U

Δp

Veetas

Vaatlеме ühtlaselt liikuvat häiritust

$\eta = G(Ut - x)$

$h \frac{\partial u}{\partial t} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x}$ Impulsi võrrand x-telje suunas

Funktsioonid f, G – esialgu määratlemata

Häirituse liikumise tõttu tekib tõenäoliselt hoovus kiirusega u

Pidevus: mistahes mere punkti voolab läbi ühepalju vett

$Q = (u - U) \times (h + \eta)$ Häirituse piirkonnas (liikuv koordinaadistik)

$Q = -Uh$ Lõpmata kaugel

$u = \frac{U\eta}{h + \eta} \approx U \frac{\eta}{h}$

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Liikuva õhurõhu häirituse tekitatud pikad lained

$p_0 = f(Ut - x)$

$\eta = G(Ut - x)$

$u = \frac{U\eta}{h + \eta} \approx U \frac{\eta}{h}$

$h \frac{\partial u}{\partial t} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x}$

$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -U \frac{\partial \eta}{\partial x}$

$h \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{U\eta}{h} \right) = U \frac{\partial \eta}{\partial t} = -U^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x}$

$(U^2 - gh) \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{h}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} \Rightarrow (U^2 - gh)\eta - \frac{h}{\rho} p_0 = const$

piisavalt kaugel liikuvast häiritusest: $\eta = p_0 = 0 \quad const = 0$

$\frac{\eta}{h} = \frac{p_0/\rho}{U^2 - gh}$ $U = c_f = \sqrt{gh}$? Amplituud tõkestamata!

$U < c_f$? Rõhk / veepind vastandfaasis

$U > c_f$? Rõhk / veepind faasis

$U \gg c_f$? Häiritus väike jprotsessid

Pikad (üksik)lained

- Pikkade lainete piirjuht madalas vees: soliton
- Mittelineaarne võrrand veepinna kaju jaoks – Korteweg-de Vries
- Leviku kiirus (faasi&rühmakiirus) sõltub kõrgusest
- Knoidaalsed lained – Korteweg-de Vriesi võrrandi perioodilised lahendid

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Meteoroloogiline tsunami & lihtsalt suured lained

Kalk Bay, 26 August 2005 (Didenkulova et al. 2006)

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Maracas Beach, 16 oktoober 2005 (Didenkulova et al. 2006)

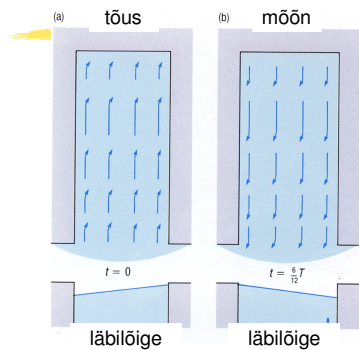
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Kelvini lained

- Väga pikad pinnalained ($c_f = \sqrt{gH}$)
- Tekivad vaid siis, kui laine saab levida piki randa või laia kanalit
- Mõjutatud Maa pöörlemisest: põhjapoolkeral parempoolne laineharja külg kõrgem
- Seetõttu võimalikud vaid suurtes veekogudes
- Kirjeldavad madala vee võrrandid
- Pööriselisus oluline – kiiruse potentsiaal ei eksisteeri ning Laplace'i võrrand ei kehti

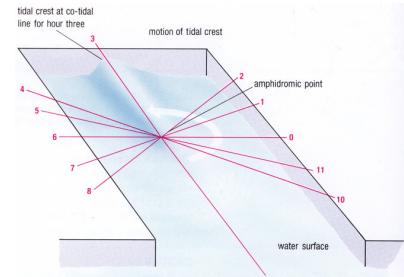
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Kuidas tõusulainest saab Kelvini laine I



Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Kuidas tõusulainest saab Kelvini laine II



Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Rõhkkonnad, veetase ja Kelvini lained

- Mistahes põhjusel tekkinud kõrge veetaseme piirkond tekitab kas
 - Tavalise (pika) pinnalaine (avamerel)
 - Kelvini laine (kanalis, ranna lähistel, kuid ainult suurel merealal, kus Coriolise jõud oluline)
 - Veetaseme loksumise (seiši)
- Kui (pool)kinnisel merealal laine jõuab tagasi algpunkti, siis veetase tõuseb jälle → võimalus resonantsiks

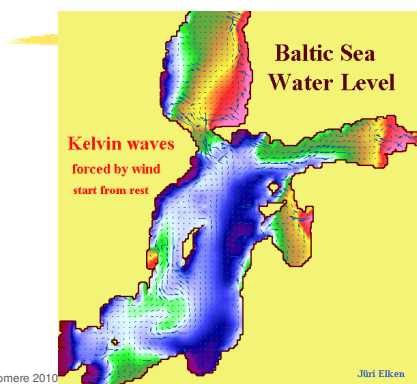
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Lisamaterjal huvilistele

Kelvini lained
Coriolisi jõu mõju tormiajule

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Kelvini laine Läänemeres



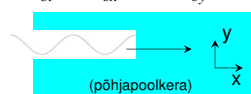
Soomere 2010 Jüri Elken

Kelvini lained: väga pikad lained: periood ~palju tunde (~ööpäev) → Coriolise jõud oluline

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - f_c V = g \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - f_c U = g \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(U(h+\eta))}{\partial x} + \frac{\partial(V(h+\eta))}{\partial y} = 0$$



$V \ll 1 \rightarrow$ Coriolise jõud ei mõjuta x-tele suunalist liikumist

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = g \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

Madala vee võrrandid juhul, kui Coriolise jõud on oluline

$$f_c = 2\Omega \sin \phi \quad \Omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

U, V- horisontaalkiiruse keskmised komponendid

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad -f_c U = g \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

Väikesed kiirused → lineariseerime, otsime lainelahendit

$$U = \frac{c}{h} \hat{\eta}(y) \cos(kx - \sigma) \quad \eta = \hat{\eta}(y) \cos(kx - \sigma)$$

$$-f_c \frac{c}{g} \frac{\hat{\eta}}{h} = \frac{d\hat{\eta}}{dy} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{d\hat{\eta}}{dy} = -f_c \frac{c}{g} \frac{\hat{\eta}}{h} = -\frac{f_c}{c_f} \hat{\eta} \Rightarrow \hat{\eta} = a e^{-f_c y / c_f}$$

090 Rannikuprotsessid

Kelvini laine kanal

Pidevuse võrrandist: faasikiirus $c_f = \sqrt{gh}$

$\eta = \hat{\eta} = ae^{-f_c y/c_f} \cos(kx - \sigma)$ veepinna kuju

$U = a \frac{c_f}{h} e^{-f_c y/c_f} \cos(kx - \sigma)$ vee kiirus

Lainehari $\cos(kx - \sigma) = 1$ Lainevagu $\cos(kx - \sigma) = -1$

$ae^{-f_c y/c_f}$ $ae^{-f_c y/c_f}$

$U = a(c_f/h)e^{-f_c y/c_f}$ $U = a(c_f/h)e^{-f_c y/c_f}$

$y > 0$: kõrgem/suurem $y > 0$: madalam/väiksem

$y < 0$: madalam/väiksem $y < 0$: kõrgem/suurem

Laine kõrgus kanali paremas servas ja vasakus servas

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Coriolise jõu mõju tormiajule

Tuulepinge $\tau_s = \rho c_f W^2$ Tormiaju η

Mere sügavus h_0 mandrilava serval

Keskmine veepiir

Põhjajahõõre $\tau(z=h)$

Mere sügavus $h=h(x)$ Statsionaarne hoovus $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$

Avameri Ranna pool

$\frac{\tau_{wy}}{\rho(h+\eta)} = \frac{f_{DW} V^2}{8(h+\eta)}$

$(h+\eta) \left[\frac{d(h+\eta)}{dx} - \frac{dh}{dx} \left(f_c \frac{V}{g} \right) \right] = \frac{\tilde{n} \tau_{wx}}{\rho g}$

$\bar{\tau}_w = \rho k_f W^2 \sin \theta$

$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\tau_{wy} - \tau_{cx}(-h)}{\rho(h+\eta)} = \frac{\tau_{wy}}{\rho(h+\eta)} - \frac{f_{DW} V^2}{8(h+\eta)}$

$V_s = W \sqrt{\frac{8k_f \sin \theta}{f_{DW}}}$

$\eta \ll h$ $V = W \sqrt{\frac{8k_f \sin \theta}{f_{DW}}} \tanh \left(t \frac{W}{h} \sqrt{\frac{k_f f_{DW} \sin \theta}{8}} \right)$ Ülesanne: Kui kiiresti tekib praktiliselt statsionaarne rannahoovus?

Lahend

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Kui kiiresti tekib praktiliselt statsionaarne rannahoovus 10 m sügavuses vees 20 m/s piki randa puhuva tuule korral?

Analüütiline lahend hoovuse kiiruse jaoks juhul $\eta \ll h$ Statsionaarne hoovus

$V = W \sqrt{\frac{8k_f \sin \theta}{f_{DW}}} \tanh \left(t \frac{W}{h} \sqrt{\frac{k_f f_{DW} \sin \theta}{8}} \right)$ $V_s = W \sqrt{\frac{8k_f \sin \theta}{f_{DW}}}$

Vaja lahendamisel defineerida: mis on praktiliselt statsionaarne (Dean&Dalrymple: 99,6% statsionaarsest, $\tanh(\pi) = 0.996$)

$t \frac{W}{h} \sqrt{\frac{k_f f_{DW} \sin \theta}{8}} = \pi$

Otsida üles kr väärtus $k_f = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-6} & W \leq W_c \\ 1.2 \times 10^{-6} + 2.25 \times 10^{-6} \left(1 - \frac{W_c}{W}\right)^2 & W > W_c \end{cases}$

Otsida üles või põhjendada fow väärtus (0.01?) $t \sim 8$ tundi

Leida statsionaarse tuulehoovuse kiirus samadel tingimustel

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Coriolis surge

Impulsi võrrand madalas vees, x-telje suunas

$(h+\eta) \left[\frac{d(h+\eta)}{dx} - \frac{dh}{dx} \left(f_c \frac{V}{g} \right) \right] = \frac{\tilde{n} \tau_{wx}}{\rho g}$ $V_s = W \sqrt{\frac{8k_f \sin \theta}{f_{DW}}}$

Ühtlaselt kaldus põhja jaoks saab analüütiliselt lahendada; lahend analoogiline otse randa puhuva tuule tekitatud tormiajuga

$\frac{x}{l^*} = \left(1 - \frac{h+\eta}{h_0} \right) - A^* \ln \frac{h+\eta - A^*}{1 - A^*}$

$l^* = \frac{l}{1 - \frac{f_c V_s l}{g h_0}} = \frac{l}{1 - \frac{f_c l}{g h_0} W \sqrt{\frac{8k_f \sin \theta}{f_{DW}}}}$ $A^* = \frac{\eta \tau_{wx} l^*}{\rho g h_0^2}$

(1) Coriolise jõu mõju: ekvivalentne mandrilava laiuse muutumisega – põhja kalde muutumisega

(2) Järeldus: Tuule kiiruse mõlemad komponendid mõjutavad tormiaju // veetaset

NB!!

Max veetase: $\sim 20^\circ$

Kohtumisnurk

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Rõhkkonnad, veetase ja Kelvini lained

- Mistahes põhjusel tekkinud kõrge veetaseme piirkond tekitab kas
 - Tavalise (pika) pinnalaine (avamerel)
 - Kelvini laine (kanalis, ranna lähistel, kuid ainult suurel merealal, kus Coriolise jõud oluline)
 - Veetaseme loksumise (seiši)
- Kui (pool)kinnisel merealal laine jõuab tagasi algpunkti, siis veetase tõuseb jälle → võimalus resonantsiks

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Seišid ehk basseini omavõnkumised

length of container, l

no current

1

2

3

4

5

6

7

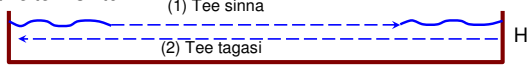
8

no current

EMH0090 Rannikuprotsessid

Seišide matemaatika: lihtne pikkade lainete teooria rakendus

Laine tekkis= t0



Laine on tagasi= t2

Basseini pikkus: L1

(1) C1=?

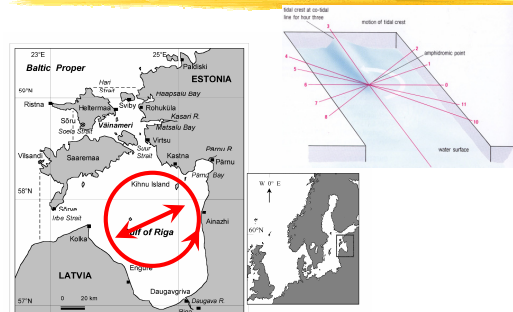
(2) Aeg, millal laine on tagasi jõudnud t2=?

(3) t2 = basseini omavõnkeperiood

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

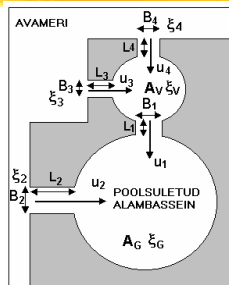
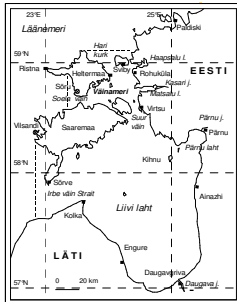
Ringikujulises meres: laine võib käia nii ringiratast piki randa kui ka risti üle mere



Kaart: Suursaar et al., 2004

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Veepind basseinis = pendel

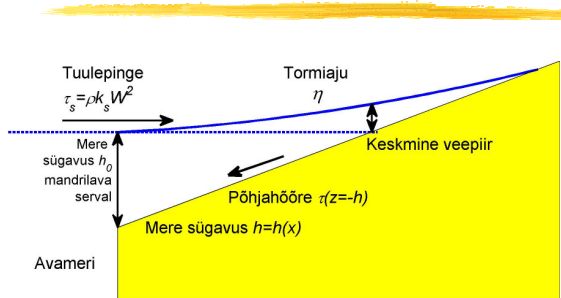


Suursaar, Ü., Kullas, T. and Otsmann, M. 2004. Currents and sea level variations in the West Estonian coastal sea. Estonia Maritime 6: 1-10

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

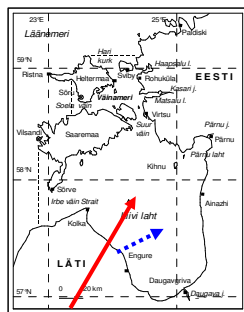
Kuidas tuul lükkab?



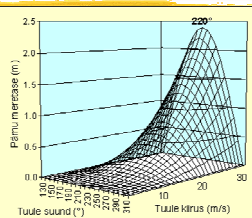
Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Kui tuul lükkab



$$dH \sim 1/h !!!!$$



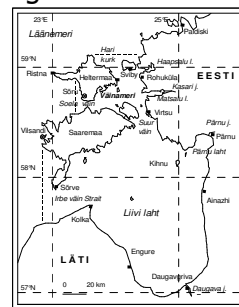
Veetaseme tõus Pärnu lahes sõltvalt tuule kiirusest ja suunast

Suursaar, Ü., Kullas, T. and Otsmann, M. 2004. Currents and sea level variations in the West Estonian coastal sea. Estonia Maritime 6: 1-10

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Pärnu probleem: mitte ainult geometria!!



$$\frac{d\eta_w}{dx} \approx \frac{\tau_s - \tau_b}{\rho g (h + \eta_w)}$$

η_w Veetaseme +/- norm

$\tau_s - \tau_b$ Tuule pinget - pinget põhjahoore tõttu

h - vee sügavus

Dean, Dalrymple, Coastal processes

Pärnu lahes - nagu Mehiko laheski: suurt osa tormitõusu kujunemisel mängib väike vee sügavus

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid