

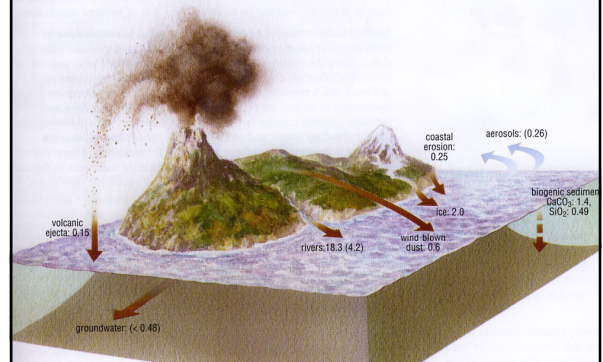
Loeng 10a

Setete transport: põhimõisted

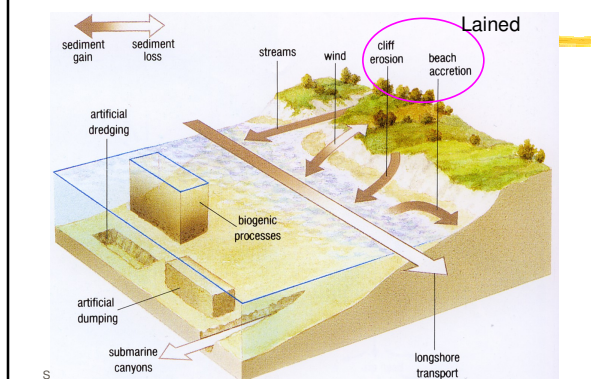
Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Settematerjali päritolu (miljardid tonnid) (sulgudes: lahustunud/aurustunud)



Kuidas setted rannikumeres ringi käivad



Setete transpordi suund: sageli aimatav ranna morfoloogia baasil



Setete transpordi kontrollivad tegurid

- Setteosakeste suurus
- Setete kohesioon / nidusus
- Setete tihedus
- Vee liikumise kiirus & suund

Setete liikumahakkamine: **läveline protsess**
Algab, kui vee kiirus > uhtumise kiirus

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

2 * 3 protsessi

Setteosakesed:

- (purdosakeste) lahtirebimine põhjast
- Transport
- Settimine

Rand tervikuna:

- Kulutus
- Transiit
- Kuhjumine

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Setteid liigutavad

Lained

- Vee liikumine pulseerub nii suuna kui kiiruse poolest
- Põhjalähedane transport kombineerituna heljumi (re)suspensiooniga
- Transport nii piki randa kui ka risti rannajoonega

Hoovused

- Vee liikumise suund & kiirus püsivad
- Põhiline heljumi transport kogu veesambas
- Peamiselt piki samasügavusjooni

Ühine omadus: vesi liigub nii lainetes kui ka hoovustes; ja liikuv vesi paneb setted liikuma

Soomere 2010

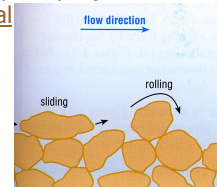
EMH0090 Rannikuprotsessid

Transpordi viisid

Põhjalähedane transport

- Libisemine (sliding)
- Veeremine (rolling)
- Hüplemine (saltation)

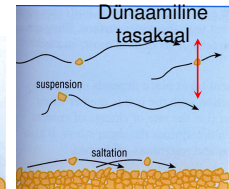
Toimub päris põhja lähedal



Soomere 2010

Heljumi transport

- Peenemad setteosakesed liiguvad koos veemassiga
- Võimalik põhjast üsna kõrgel



ssid

Miks lained sageli olulisemad

- Muutuva suunaga liikumised haaravad kergemini setteosakesi kaasa
- Murduvad lained tekitavad turbulentsi → kohati väga suured vee kiirused
- Turbulents hajutab peeneteralisi setteid (sh orgaanika) põhjast kõrgemale
- Orbitaalkiiruste ebaühtlus: pinnal → ranna poole, põhja lähedal → sügavamale (diferentsiaalne transport sõltuvalt terasuurusest)

Soomere 2010

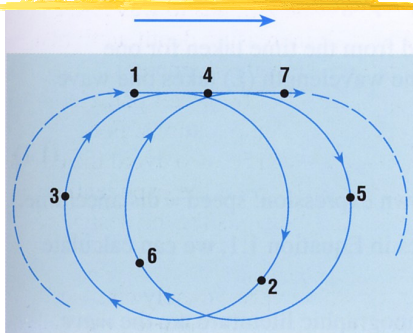
EMH0090 Rannikuprotsessid

Transport lainetes

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Vee edasikanne peaaegu lineaarsetes lainetes: trajektoorid ei ole suletud



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Lainete poolt tekitatud vee transport

Vee pinnal toimuv transport: keskmine kiirus $\bar{u}(x, \eta) = \frac{a^2 k \omega}{2} = \frac{1}{2} (ak)^2 c_f$
Oluline parameeter: ak

Kogu veesambas toimuv vee netotransport (tihedus) $M = \frac{E}{c_f}$ Starr (1947)

Transport toimub veekihi laine tallast harjani

Keskmine vee kiirus kogu veesambas $U = \frac{M}{\rho H} = \frac{E}{\rho H c_f}$

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Mittelineaarsed efektid lineaarsete lainete juures: Radiation stress ehk kiirguspinge

- Lainepinge dimensioon: jõud pinnäühikule (tüüpiline pinnajõud, **vektor**)
- Tekib siis, kuid lained põhjustavad impulsi / massi levikut
- Impulsi voog on suurem laine harja juures (lainelevi suunas) ja väiksem talle all (vastassuunas)
- Tekib seetõttu, et lainete kõrgus on lõplik – s.t. mittelineaarne efekt;
- Ometi kasutatakse selle omaduste selgitamiseks lineaarset laineteooriat
- Põhjustab: veetaseme tõusu rannal, langust murdlainete tsoonis ning piki randa suunatud hoovuseid

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

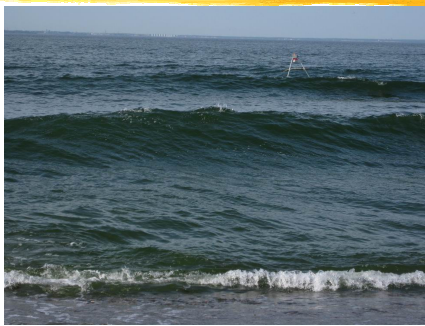
Lained rannas

- muutuvad ebasümmeetriliseks ja murduvad → vee transport ranna suunas laine harja lähistel
- tekitavad lokaalse veetõusu (wave set-up)
- tekitavad tagasivoolu põhja lähedal
- tekitavad rannaga risti olevaid hoovuseid (rip currents)
- tekitavad piki randa liikuvaid hoovuseid

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

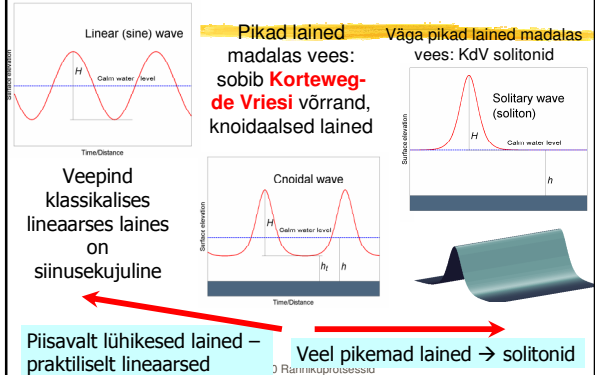
Kõrge laine ranna lähistel: ei ole siinusekujulise profiiliga



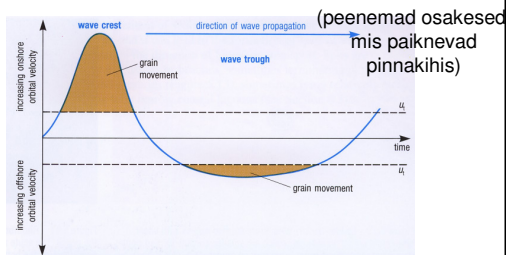
Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Lineaarne – knoidaalne – soliton



Vee & setete edasikanne tugevalt asümmeetrilistes lainetes ranna lähistel



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Lained rannas

- muutuvad ebasümmeetriliseks ja murduvad → vee transport ranna suunas laine harja lähistel
- tekitavad lokaalse veetõusu (wave set-up)
- tekitavad tagasivoolu põhja lähedal
- tekitavad rannaga risti olevaid hoovuseid (rip currents)
- tekitavad piki randa liikuvaid hoovuseid

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Laine rannas: vee liikumine edasi-tagasi

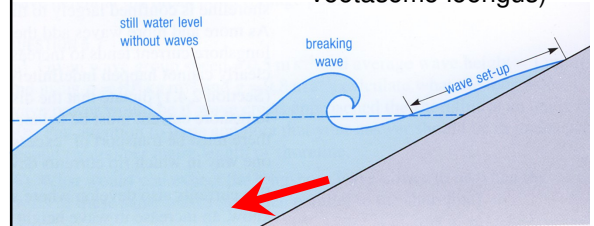


Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Lokaalne veetõus rannas

(lähemalt vaadeldud veetaseme loengus)



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

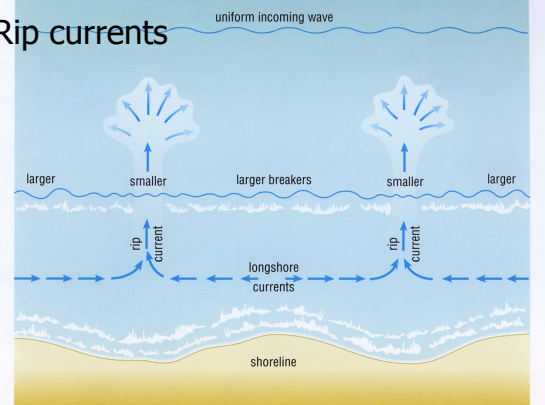
Lained rannas

- muutuvad ebasümmeetriliseks ja murduvad → vee transport ranna suunas laine harja lähistel
- tekitavad lokaalse veetõusu (wave set-up)
- tekitavad tagasivoolu põhja lähedal
- tekitavad rannaga risti olevaid hoovuseid (rip currents)
- tekitavad piki randa liikuvaid hoovuseid

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Rip currents



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Rip currents: Küpros, 2010



Soomere 2010

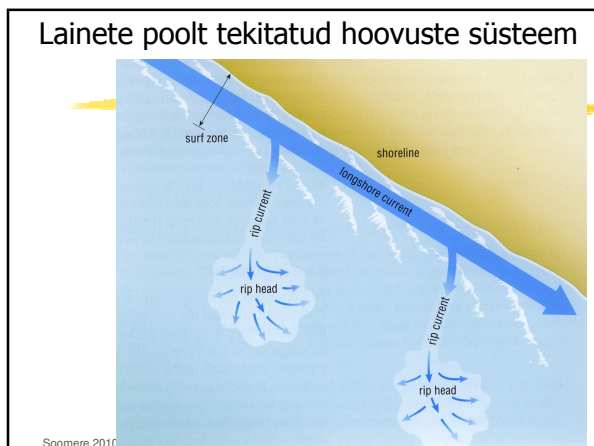
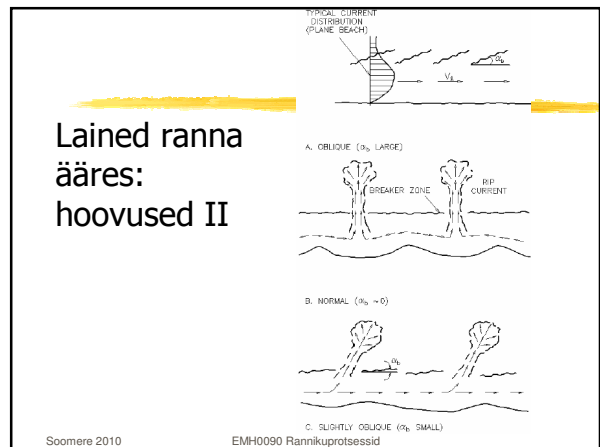
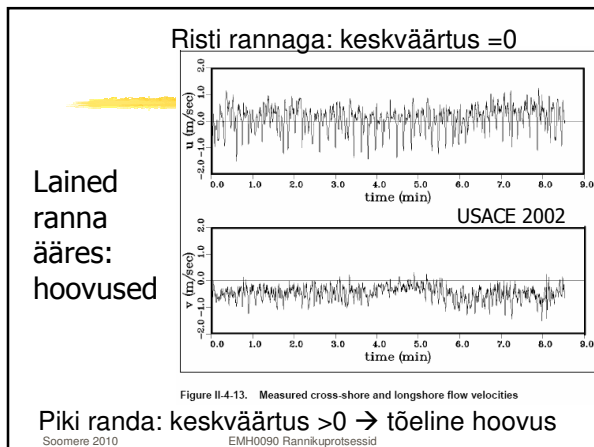
EMH0090 Rannikuprotsessid



Lained rannas

- muutuvad ebasümmeetriliseks ja murduvad → vee transport ranna suunas laine harja lähistel
- tekitavad lokaalse veetõusu (wave set-up)
- tekitavad tagasivoolu põhja lähedal
- tekitavad rannaga risti olevaid hoovuseid (rip currents)
- tekitavad piki randa liikuvaid hoovuseid

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid



Lainete poolt tekitatud hoovuse kiirus sõltub:

- Lainekõrgusest
- Lainete levikusuunast: $\sim \sin(\alpha)$
- Laineenergia randa jõudmise kiirusest: $\sim \cos(\alpha)$
- Ranna omadustest

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Sõltuvus on üsna keerukas

$$V = \frac{5\pi \tan \beta^*}{16 C} \gamma_b \sqrt{gh} \sin \alpha \cos \alpha \quad (\text{Longuet-Higgins})$$

$$\tan \beta^* = \frac{\tan \beta}{(1 + 0.375 \gamma_b^2)} \quad \text{Modifitseeritud rannanõlva kalle tan} \beta$$

$$\gamma_b = \frac{h_b}{H_b} \approx 0.6 + 1.5 \quad \text{Murdumissügavuse indeks = murduva laine kõrgus / vee sügavus murdumiskohal}$$

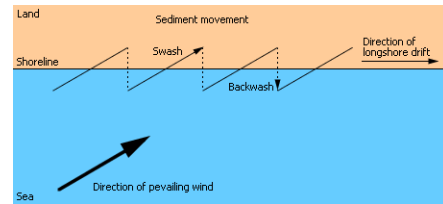
$C \sim 0.005-0.01$ – põhjahõõrde koefitsient

$$V_{mid} = 1.17 \sqrt{gh_{rms}} \sin \alpha \cos \alpha \quad (\text{Komar 1979, kehtib murdlainete tsooni keskel})$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannakuprotsessid

Kuidas lained transpordivad



Soomere 2010

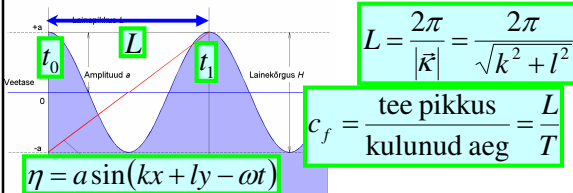
EMH0090 Rannakuprotsessid

Laine kiirus I: liiguvad laineharjad

DEFINITSIOON

FAASIKIIRUS on laineharjade leviku kiirus

$$T = t_1 - t_0 = \frac{2\pi}{\omega}$$



$$\omega(\vec{\kappa}) = \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad c_g = \frac{L}{T} = \frac{2\pi/\kappa}{2\pi/\omega} = \frac{\omega}{\kappa} = \frac{\omega}{\sqrt{k^2 + l^2}}$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannakuprotsessid

Kiirus 2: vesi liigub laine sees

$$\varphi = f(z) \sin(kx + \omega t) \quad f(z) = \frac{ag \cosh k(z+H)}{\omega \cosh kH}$$

Lõpliku sügavusega vesi

$$\text{Horizontaal-suund} \quad u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{agk \cosh k(z+H)}{\omega \cosh kH} \cos(kx + \omega t)$$

$$\text{Vertikaal-suund} \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{agk \sinh k(z+H)}{\omega \cosh kH} \sin(kx + \omega t)$$

Kiirus 3: energia liigub rühmakiirusega

$$c_g = \partial \omega / \partial k$$

Soomere 2010

EMH0090 Rannakuprotsessid

Laine poolt tekitatud maksimaalne põhjalähedane kiirus

$$V(z) = \sqrt{u^2 + w^2} = \frac{agk}{\omega \cosh kH} \times \sqrt{\cos^2(kx - \omega t) + \sinh^2 k(z+H)} \quad V_{mean} = \frac{2V_{maxb}}{\pi}$$

$$\sinh x = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x}) \quad V_{max}(z=-H) = \frac{agk}{\omega \cosh kH}$$

Veesakeste kiirus laines (ka lõpmata sügavas meres) → $V = \frac{agk}{\omega e^{kH}} \frac{1}{2}(e^{-kH} + e^{kH})$

sügavusel -H: sõltub nii mere sügavusest, lainekõrgusest kui perioodist

$$V_{max}(-H) = \frac{a\omega}{\sinh kH}$$

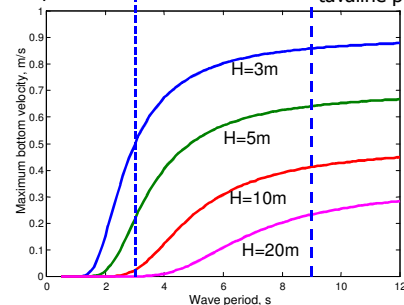
Soomere 2010

EMH0090 Rannakuprotsessid

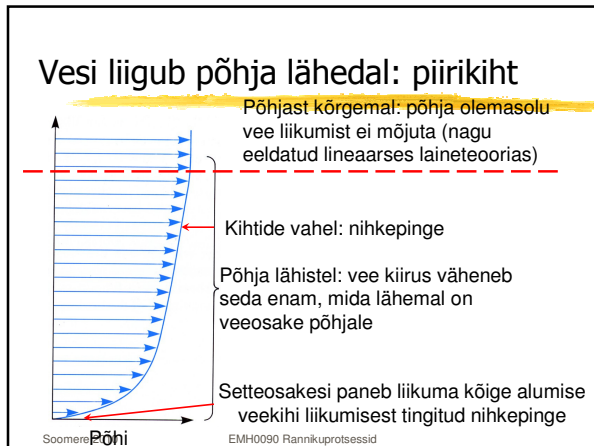
Kui suur on põhjalähedane kiirus?

Lainekõrgus 1 m

Looduslike lainete tavaline period 3s; Kiirlaevainete tavaline period >9s



So

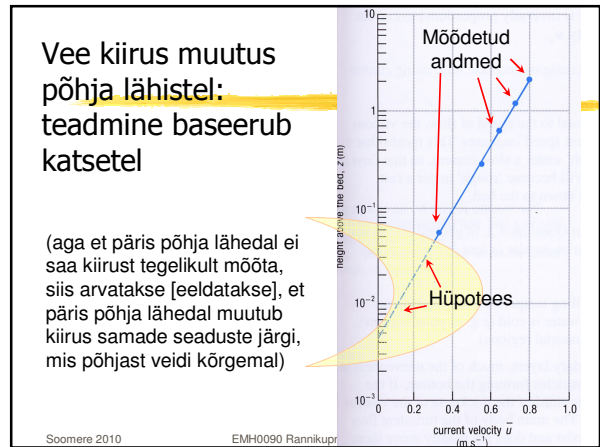
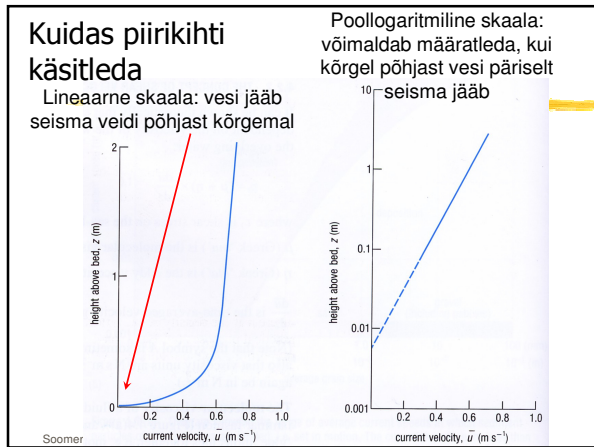


Piirikihi käsitlus

- Nihkepinget põhjas (enamasti) otseselt ei mõõdeta – see arvutatakse selle kaudu, kuidas vee kiirus muutub põhja lähedal
- Eeldatakse, et vee kiirus väheneb logaritmiliselt
- Kusjuures vesi jääb 'seisma' veidi põhjast kõrgemal
- 'Seisva' veekihi kõrgus põhjast = **põhja karedus**
- mis EI OLE otseselt seotud põhja ebatasasuste kõrguse või setete terasuurusega
- Nihkepinge $\tau_0 \propto \rho \hat{u}^2$, kus \hat{u} on mingi kiirus (mida püüame edasises määratleda)
- Nihkepinge ühik – sama, mis rõhu ühik

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid



Piirikiht ja nihkepinge: alternatiivne definitsioon

Nihkepinge põhjas (=mõjub sette osakestele)

$$\tau_0 = (\mu + \eta) \frac{du}{dz}$$

Kiiruse gradient vahetult põhja lähedal (väga raske määrata)

Molekulaarne viskoossus

Eddy viscosity (turbulentne viskoossus)

Molekulaarne viskoossus: vedeliku omadus

Turbulentne viskoossus: vedeliku liikumise omadus

Mõlemaid on võimalik mõõta või hinnata

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Nihkekiirus: kiirus, mida pole olemas!

Kiiruse vertikaalset muutumist peegeldava sirge tõus poollogaritmilistes koordinaatides

$$v = Kv_1 + v_0$$

$$u_* = \frac{1}{5.75} * K$$

Nihkekiirus

Katseliselt määratud (empiriline) konstant

(sõltub log alusest!)

$$K = \frac{du}{d(\log z)} = z \ln 10 \frac{du}{dz}$$

pinna karedus

From the graph:
 $d\hat{u} = 0.71 - 0.23 = 0.48 \text{ m s}^{-1}$
 $d \log z = \log_{10}(10^{-1}) - \log_{10}(10^{-2})$
 (i.e. $\log_{10} 0.1 - \log_{10} 0.01$)
 $= (-1) - (-2) = 1$

From Equation 4.3:
 $u_* = \frac{1}{5.75} \times \frac{d\hat{u}}{d \log z}$
 $= \frac{1}{5.75} \times \frac{0.48}{1}$
 $= 0.083 \text{ m s}^{-1}$

$z_0 = (3.5 \times 10^{-3} \text{ m or } 3.5 \text{ mm})$

Probleeme nihkekiirusega

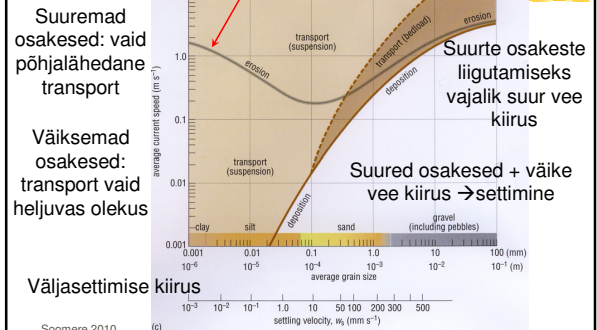
- z_0 ja u^* on teatavad **tuletatud suurused**, mitte reaalsed
- Teoria kehtib ainult laminaarse voolamise korral
- Kiiruse profiil ei pruugi olla sirge, eriti ajas muutuva hoovuse/laine tingimustes
- Teoria kehtib ainult horisontaalse põhja jaoks

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Vee kiirus ja ja setete liikumine

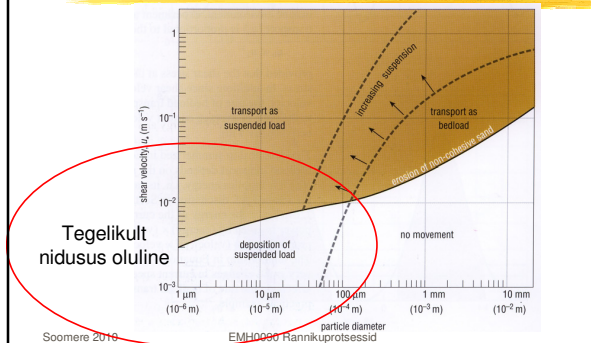
Osakeste lahtirebimine raskendatud tänu nidususele



Soomere 2010

(c)

Nihkekiirused liiva & kruusa jaoks (nidusus ebaoluline)



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Transpordi intensiivsus (empiirika)

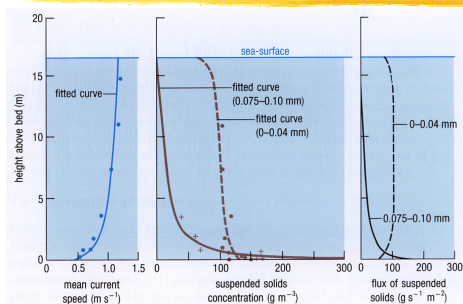
- | | |
|--|---|
| Põhjalähedane | Heljuvas olekus |
| ➤ ~ nihkekiirus kuubis | ➤ Setteosakeste kontsentratsioon * hoovuse kiirus |
| ➤ → ~hoovuse kiirus / orbitaalkiirus kuubis | ➤ Sõltub (re)suspensiooni ja settimise bilansist |
| ➤ Proportsionaalne hoovuse / lainetuse poolt arendatava võimsusega | ➤ (Re)suspensioon |
| ➤ Väikesed muutused kiiruses → suur muutus transpordis | ➤ ~ hoovuse kiirus ruudus |

Rannaprotsessid ebaoproportsionaalselt intensiivsed tugevate tormide ajal

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Erineva terasuurusega setted: kantakse edasi erinevatel kõrgustel

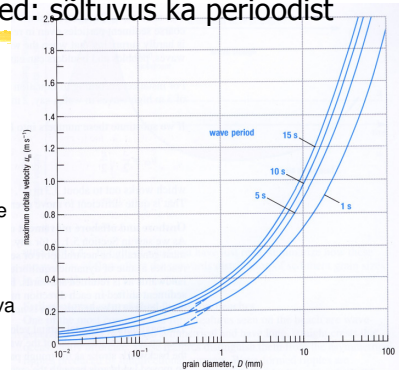


Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Lainete põhjustatud transpordi iseärasused: sõltuvus ka perioodist

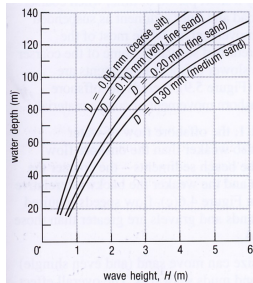
Põhjalähedane kiirus erineva perioodiga lainetes, mis paneb kvartsliaa liikuma



Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Pikad lained: "ulatuvad" sügavale



15s perioodiga laine kõrgus, mis paneb setteosakesed liikuma (horisontaalne põhi)

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

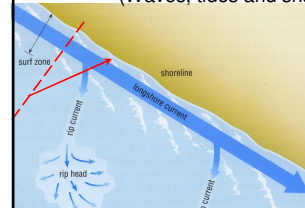
Laine tekitatud hoovus: tekitab ka transpordi

$$P_1 = c_g \left(\frac{1}{8} \rho g h^2 \right) \sin \alpha \cos \alpha$$

Lainete võimsus rannajoone sihis

rannajoone meetri kohta!

Liiva transport piki randa: ligikaudne hinnang (Waves, tides and shallow-water processes)



$$q_l = \frac{0.77 P_1}{g(\rho_s - \rho)0.6}$$

0.77: iseloomustab vee tungimist liivamassidesse

0.6: iseloomustab liiva "pakituse" astet

kuprotsessid

Setete transpordi arvutamine

1. Resuspensiooni intensiivsus $q_r = M\rho(u_{*r}^2 - u_{*c}^2)$ $u_{*r}^2 > u_{*c}^2$

u_{*c} - nihkekiirus u_{*r} resuspensiooni kriitiline nihkekiirus
M [s/m] iseloomustab setete tüüpi

Resuspensiooni summaarne intensiivsus mingil ajavahemikul pinnauhiku kohta -- integraal

2. Põhjalähedase transpordi intensiivsus

$$q_b = \rho_s \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \left(\frac{4u_{*b}^2}{(s-1)gd_{50}} - 0.188 \right)^{3/2} \quad u_{*b}^2 > u_{*cb}^2 \quad s = \rho_s / \rho$$

u_{*cb} põhjalähedase transpordi kriitiline nihkekiirus
 d_{50} keskmine terasuurus

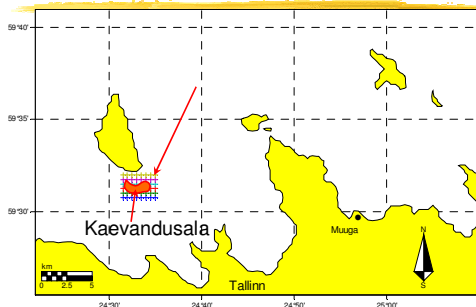
Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Summaarse transpordi leidmine on keerukas – kaasajal võib usaldada vaid suurusjärku

(aga näiteks muutunud sügavuse puhul saab üsna täpselt hinnata transpordi muutusi)

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Naissaare juurest kaevandati 2003-2004 suur hulk liiva



Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

Pinnasepump-süvendaja Seaway täislastis



Foto: Tarmo Kõuts

Soomere 2010 EMH0090 Rannikuprotsessid

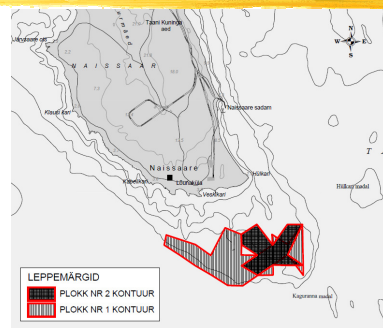
Kaevandusala õhust

Foto: Andres Kask



Soomere 2010

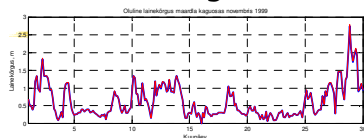
Kaevandusala: veealune liivaneemik



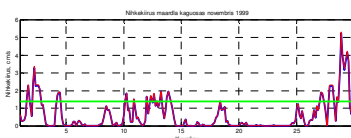
Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Oluline lainekõrgus ei muutu



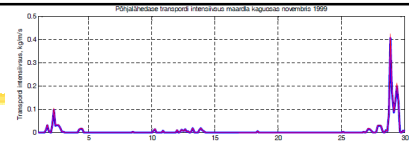
Aga nihkekiirus – tänu sügavuse suurenemisele - siiski



Põhjalähedase transpordi kriitiline nihkekiirus

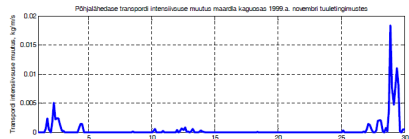
Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid



Joonis 10. Põhjalähedase transpordi intensiivsus punktis koordinaatidega 59°31.25'N, 24°35'E 1999.a. novembris (sinine joon) ning samades tuuletingimustes pärast kaevandamist (punane joon).

Intensiivsuse muutus: arvestatav



Joonis 11. Vee sügavuse suurenemisest tulenev põhjalähedase transpordi intensiivsuse muutus punktis koordinaatidega 59°31.25'N, 24°35'E 1999.a. novembris tuuletingimustes.

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

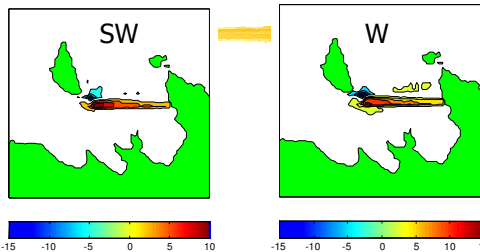
Põhjalähedase transpordi intensiivsus muutus: vähenes tänu vee sügavuse suurenemisele

	24°31.5'	24°32'	24°32.5'	24°33'	24°33.5'	24°34'	24°34.5'	24°35'
59°32'	0.0079	0.009	0.006	-0.02	0.097	0.4	0.22	-0.43
59°31.75'	0.004	0.021	0.034	0.053	0.35	0.26	-0.66	-1.37
59°31.5'	-	0	-0.048	0.11	-0.094	-13.5	-13.8	-2.12
59°31.25'	-	-0.022	-	0.1	-10.6	-42.4	-10.6	1.41
59°31'	-	-	-	-0.21	0	0.67	1.39	1.49
59°30.75'	-	-	-	-	-	0.21	0.59	-

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid

Lainekõrguste muutumine: huvitav muster



Tuul: 6 tundi, 15 m/s; isojoonte vahe 2.5cm

Lainekõrguse muutumine: refraktsiooni intensiivsuse mutumise kaudu

Soomere 2010

EMH0090 Rannikuprotsessid