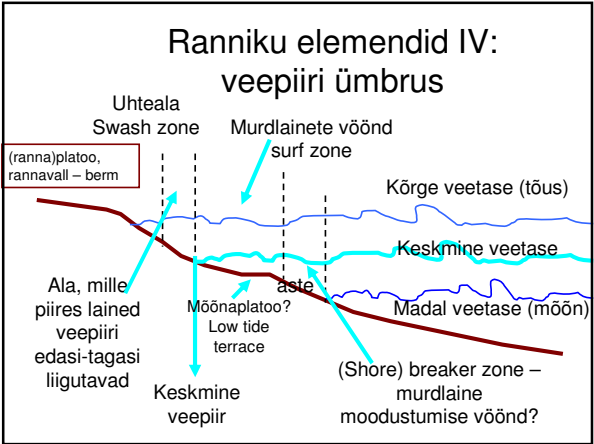
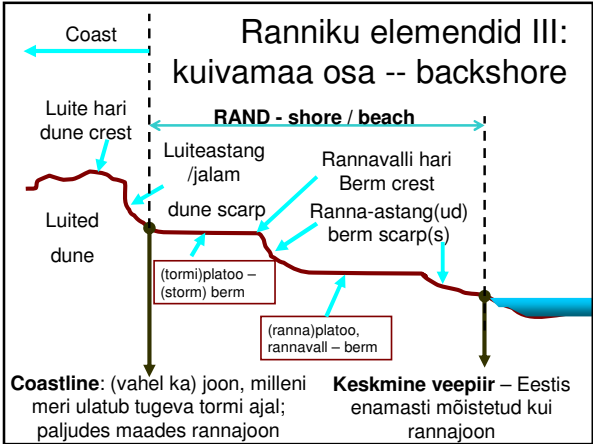
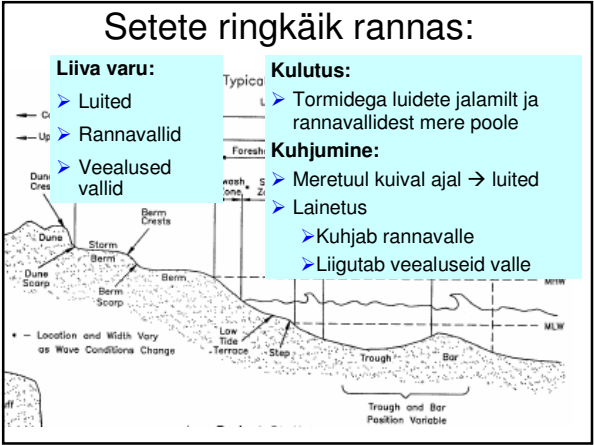
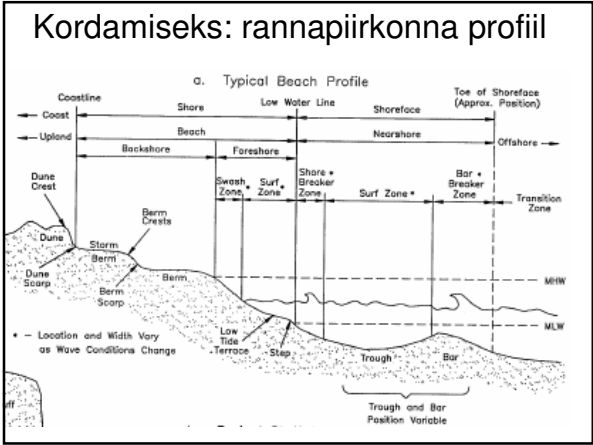
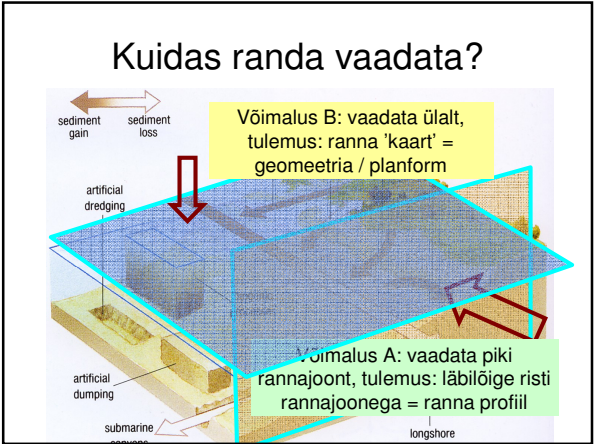


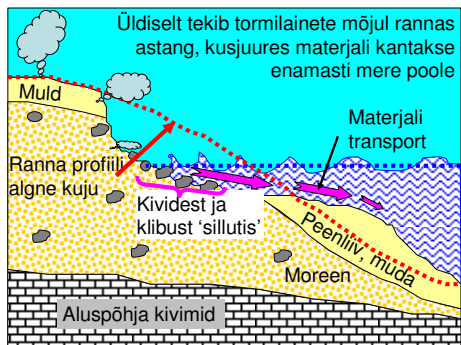
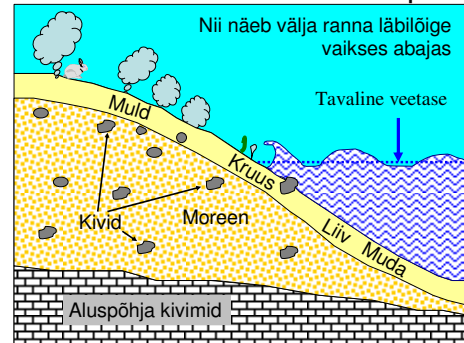
Loeng 12/13
Liivarandade teooria I
 Veealuse rannaprofiili käsitus:
 Tasakaaluliste randade teooria



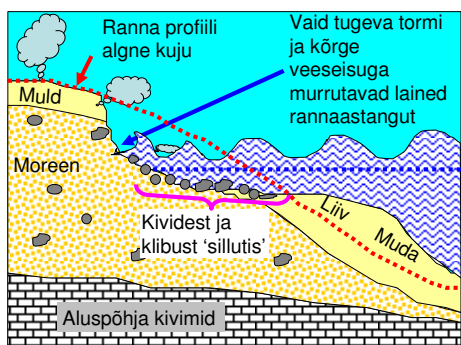
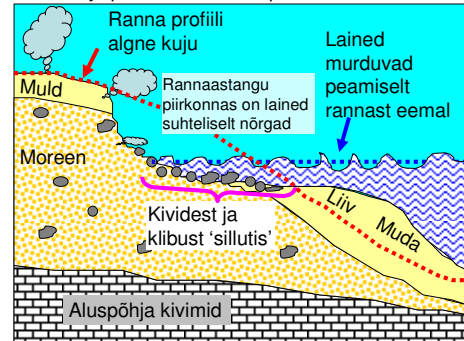
Ranniku elemendid V

ehk (liiva)randade veealune osa

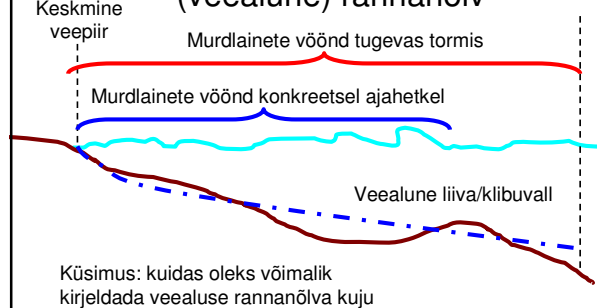
Ranna evolutsiooni ideaalpilt

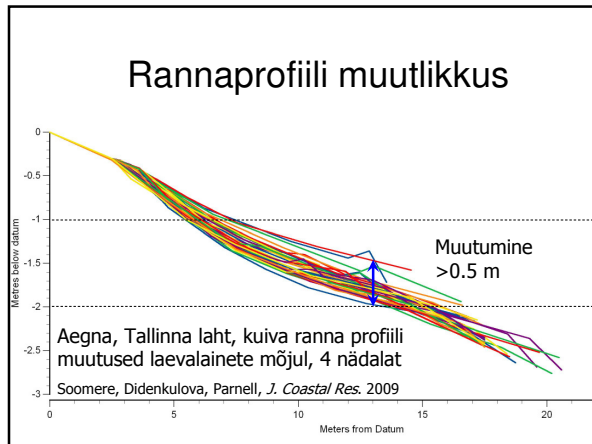


Mõne aja pärast tekib rannaprotsessides tasakaal

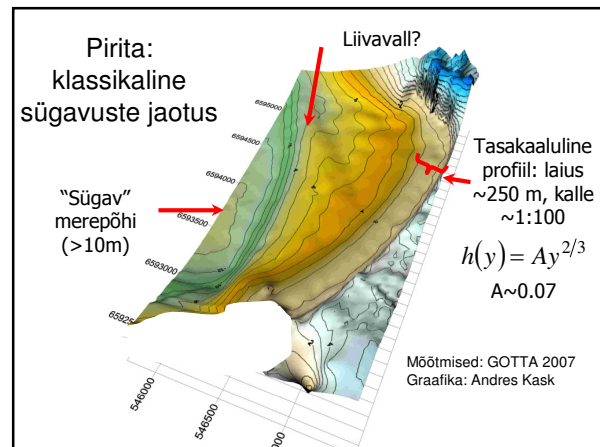
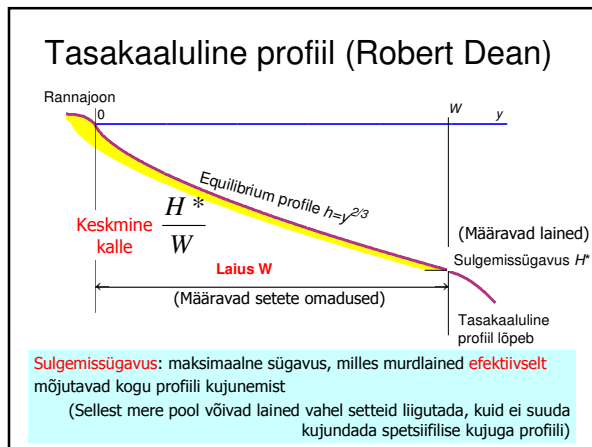


Ranniku elemendid V: (veealune) rannanõlv





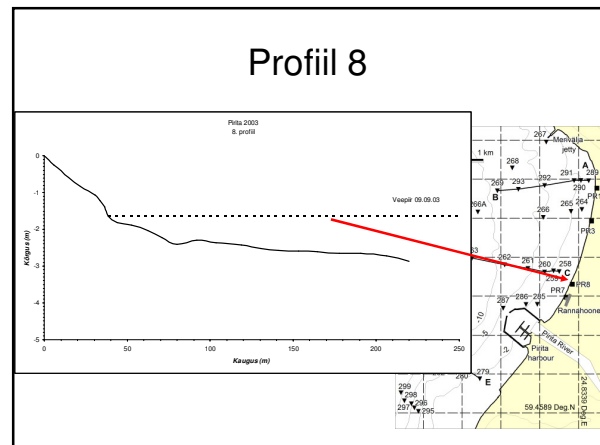
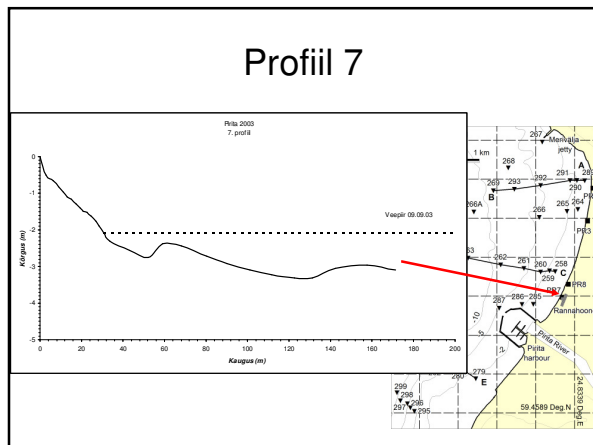
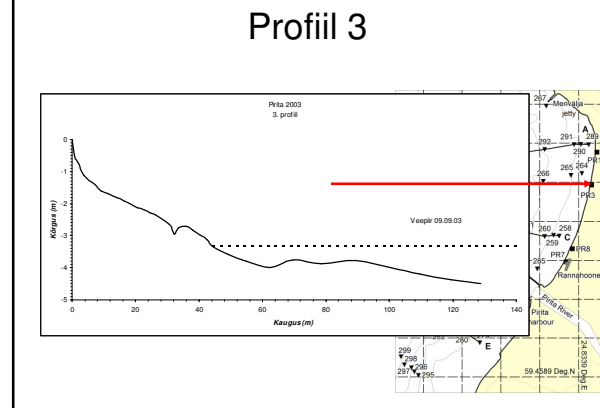
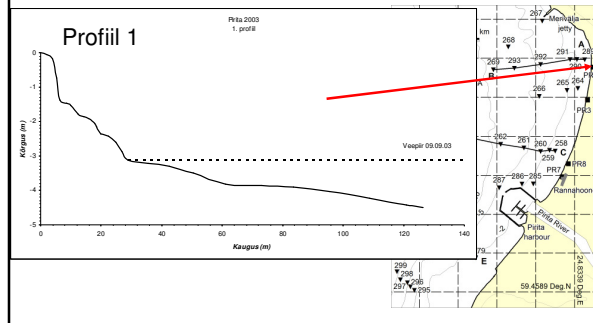
- ### Ranna(nõlva)profiil
- Ranna profiil = vee sügavuse muutumine rannajoonest ehk veeliinist avamere suunas
 - *Tasakaaluline profiil* on tekib idealiseeritud juhul, mil rannale mõjuvad destruktiivsed ja konstruktiivsed jõud on tasakaalus
 - Laboratooriumi tingimustes on võrdlemisi lihtne tasakaalulise profiilini jõuda
 - Tavaliselt kujuneb uuritav profiil katse algusjärgus päris nobedasti ümber
 - Teatava aja pärast tekkinud „lõplik“ profiil enam praktiliselt ei muutu
 - Saavutatud ranna kuju ongi konkreetsele ranna materjalile ja rakendatud lainetuse omadustele vastav tasakaaluline profiil



- ### Realistlik rannaprofiil
- Looduses vaadeldakse tasakaalulist profiili dünaamilise suurusena, kuna nii lainetuse omadused kui ka veetaseme muutuvad pidevalt
 - Võimalikud hüppelised muutused veetaseme tõusu ja/või tugevate tormide tulemusena.
 - (Keskmine) **tasakaaluline profiil = pika aja kestel esinenud erinevatele looduslikele tingimustele vastavate tasakaaluliste profiilide keskmine**
 - Tasakaaluline rannaprofiil on kahemõõtmelise - ignoreeritakse materjali edasikandumist piki randa
 - Siiski aktsepteeritav kohtades, kus transiit on konstantne
 - Oluline kontseptsioon rannikutehnika ülesannete lahendamisel
 - Keskne roll ranna täitmise projektide juures

- ### Kuidas mõõta või arvutada tasakaalulist rannaprofiili I
- **Pragmaatiline lähenemine (rikaste puhul)**
 - mõõta, mõõta, mõõta ... nii tihti ja nii paljudes kohtades, et neist saaks leida aksepteeritavad keskmised
 - **Kinemaatiline lähenemine**
 - üksikute liivaterade liikumine leitakse vastavalt neid liikumapanevatele jõududele
 - tasakaaluline profiil arvutatakse lähtudes tingimusest, et liiva hulk igas profiili punktis on konstantne (Eagleson, Glenne ja Dracup 1963)
 - praeguste teadmiste juures võimatu
 - põhiline raskus on liivaterade astronoomiline arv

Näide: rannaprofiilid Pirtal



Kuidas mõõta või arvutada tasakaalulist rannaprofiili II

► **Pragmaatiline lähenemine (rikaste puhul)**

- mõõta, mõõta, mõõta ... nii tihti ja nii paljudes kohtades, et neist saaks leida aksepteeritavad keskmised

► **Kinemaatiline lähenemine**

- üksikute liivaterade liikumine leitakse vastavalt neid liikumapanevatele jõududele
- tasakaaluline profiil arvutatakse lähtudes tingimusest, et liiva hulk igas profiili punktis on konstantne (Eagleson, Glenne ja Dracup 1963)
- praeguste teadmiste juures võimatu
- põhiline raskus on liivaterade astronoomiline arv

Kuidas mõõta või arvutada tasakaalulist rannaprofiili III

► **Empiiriline lähenemine:**

- puhtalt kirjeldav
- püüab määratleda ranna profiile selliste (pinna)vormide kaudu, mis on vastavalt rannatüübile kõige iseloomulikumad
- eksperimentide alusel leitakse selliste vormide omaduste empiirilised seosed kas setete terasuuruse või lainetuse omadustega; vahel ka mõlemaga

► **Dünaamiline lähenemine**

- eeldatakse, et põhjale mõjuvad jõud on tasakaalus
- vähem üldine rannas toimuvate protsesside täieliku mõistmise seisukohalt
- märksa kergemini rakendatav praktiliste ülesannete lahendamisel.

Dünaamiline lähenemine ehk tasakaalu otsimine

- Printsip: tasakaaluline rannaprofiil peegeldab rannas toimivate jõudude tasakaal
- Kui üks ‚võistlevatest‘ jõududest muutub on tasakaal häiritud; osa jõududest domineerivad → rannaprofiil muutub selliseks, et jõud on jälle tasakaalus.
- **Destruktiivsed jõud**: püüavad ranna profiili lamedamaks muuta või liivaterasid sügavamale toimetada
- **Konstruktiivsed jõud**: püüavad ranna profiili järsemaks muuta resp. liivaterasid rannale lähemale tuua

Destruktiivsete jõudude näiteid

- püüavad ranna profiili lamedamaks muuta või liivaterasid sügavamale toimetada
 - **Gravitatsioonijõud**
 - tendents kõike siledamaks muuta
 - **Turbulents (murduvates lainetes)**
 - tendents kõike läbi segada & põhja siledamaks muuta
 - **Tagasivedu (undertow)**
 - lainete poolt randa viidud vee liikumine tagasi avamere / sügavama ala poole

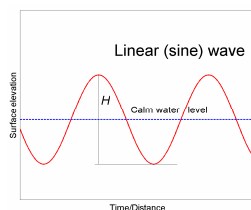
Konstruktiivsete jõudude näiteid

- püüavad ranna profiili järsemaks muuta resp. liivaterasid rannale lähemale tuua
 - **madalasse vette liikuva lainetuse** **mittelineaarsus**
 - **põhjalähedased lokaalsed hoovused** (streaming velocities at the bottom)
 - **veesambas paikneva heljumi vertikaalse jaotuse ebaühtlus**

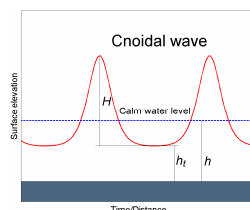
Madalasse vette liikuva lainetuse mittelineaarsus

- lainete kuju & kiiruste jaotus laine sees on ebasümmeetrilised
 - veeosakeste kiirused laine harja all on suuremad, kuid esinevad lühema aja vältel kui veeosakeste kiirused laine talla all
 - kuna nihkepinge sõltub põhjalähedase kiiruse ruudust, on keskmine nihkepinge üldiselt nullist erinev
 - ja suunatud ranna poole

Lained madalas vees



Laine sügavas vees:
perfektneline siinus

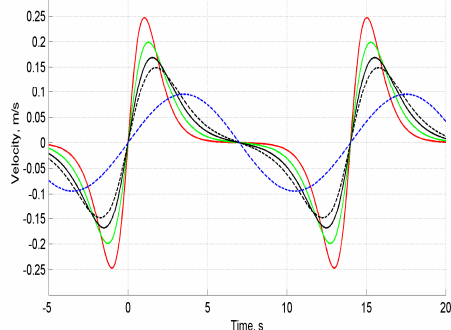


Laine madalas vees:
saledad laineharjad,
lamedad tallad

Madalasse vette liikuva lainetuse mittelineaarsus

- lainete kuju & kiiruste jaotus laine sees on ebasümmeetrilised
- veeosakeste kiirused laine harja all on suuremad, kuid esinevad lühema aja vältel kui veeosakeste kiirused laine talla all
 - kuna nihkepinge sõltub põhjalähedase kiiruse ruudust, on keskmine nihkepinge üldiselt nullist erinev
 - ja suunatud ranna poole

Kiirused mittelineaarses laines (knoidaalsete lainete teooria)



Madalasse vette liikuva lainetuse mittelineaarsus

- lainete kuju & kiiruste jaotus laine sees on ebasümmeetrilised
- veeosakeste kiirused laine harja all on suuremad, kuid esinevad lühema aja vältel kui veeosakeste kiirused laine talle all
- kuna nihkepinge sõltub põhjalähedase kiiruse ruudust, on keskmine nihkepinge üldiselt nullist erinev
- ja suunatud ranna poole

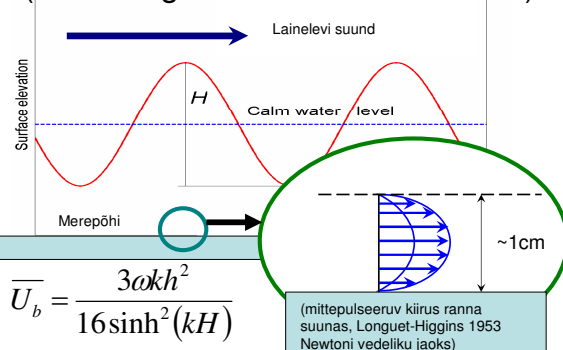
$$\overline{\tau}_b = \frac{\rho g}{8} \overline{U_b} |\overline{U_b}|$$

f – Darcy-Weisbachi hõõrdetegur

Põhjalähedased lokaalsed hoovused (streaming velocities at the bottom)

- esinevad murdlainete tsoonis ning sellest veidi mere suunas
- tekivad põhjalähedases piirkihis vee viskoossusse tõttu aset leidva energia dissipatsiooni tulemusena
- mille tõttu omakorda leiab aset lokaalne impulsi ülekanne
- Laborieksperimendid **Bagnold (1947)**

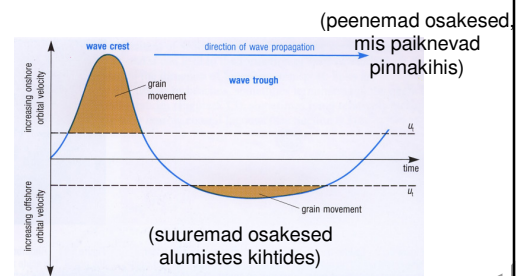
Põhjalähedased lokaalsed hoovused (streaming velocities at the bottom)



Veesambasse paisatud setteosakeste vertikaalse jaotuse ebaühtlus

- lained transpordivad erineva terasuuresega heljumi osakesi ranna suunas selektiivselt
- Setteosakesi, mis paiknevad laine harja lähistel, kantakse esialgu ranna suunas
- Kui väljasettimise aeg (fall time, t_f) on väiksem kui $T/2$, kannab lainetus setteosakesi põhiliselt ranna poole
- Kui väljasettimise aeg $T > t_f > T/2$, võib domineerida rannast eemale suunatud transport (Dean 1973)

Vee & setete edasikanne tugevalt asümmeetrilistes lainetes ranna lähistel



Füüsikalised suurused tasakaalulise ranna teoorias

- Lainetuse energia merepinna ühiku kohta $E = \frac{1}{8} \rho g h^2$
- Lainete energia voog ehk võimsus laineharja pikkuse ühiku kohta $F = E c_g$
- Rühmakiirus madalas vees $c_g = \sqrt{gH}$
- Sügavus H, milles lained hakkavad murduma (spilling breaker assumption) $h = \kappa H$
- lainete murdumise indeks ehk lainekõrguse ja sügavuse suhe $\kappa \approx 0.8$ murdumise algushetkel

Murdlainete vöönd: sageli päris lai



Murduvas laines liigub vesi väga intensiivselt

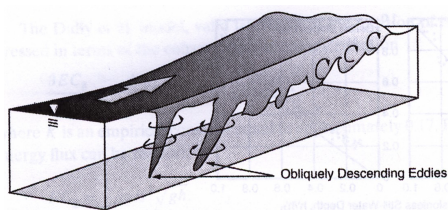


Figure 5.5 Schematic of vertically descending eddies with the arrow showing the direction of breaker travel (from Nadaoka 1986).

Seega murdlainete vööndis liigutatakse liiva praktiliselt kogu aeg

Setete transport murdlainete vööndis: võib rakendada mitmesuguseid eeldusi

- Homogeenne lainete energia dissipatsioon vee ruumalaühiku kohta
- Homogeenne lainete energia dissipatsioon mere pinnaühiku kohta
- Homogeenne nihkepinge merepõhjas
- (me ei saa neist ühtki tegelikkuses kontrollida; või on kontrollimine väga kallis; kriteerium: rannaprofiil tegelikkuses)

Homogeenne lainete energia dissipatsioon vee ruumalaühiku kohta

- Murdlainete vööndis tekivad turbulents on domineeriv destruktivne jõud
- Turbulentsi intensiivsus on määratud lainete murdumisel vee lokaalsele liikumisele (= turbulentsile) edastatava energia hulgaga veemassi ruumalaühiku kohta
- Energia dissipatsioon on homogeenne kogu veesambas

Veidi valemeid

laineeenergia voo P muutus mingi sügavusega H kohas $\frac{1}{H} \frac{dP}{dy} = -D_*(d)$ energia dissipatsiooni intensiivsus (seda väljendab tegur $1/H$) d - terasuurus
Eeldus: sõltub vaid terasuurusest

- (1) Rand on tasakaalus \rightarrow sellise intensiivsusega turbulents (keskmiselt!) veel ei liiguta setteosakesi
- (2) Energia dissipatsioon on homogeenne

$$E = \frac{1}{8} \rho g h^2$$

$$P = E c_g$$

$$c_g = \sqrt{gH}$$

$$h = \kappa H$$

$$\frac{1}{H} \frac{d(\rho g \kappa^2 H^2 \sqrt{gH})}{8dy} = -D_*(d)$$

Rannaprofiili tasakaalu tingimus

$$\frac{d(\rho g \kappa^2 H^2 \sqrt{gH})}{8Hdy} = -D_*(d) \quad \frac{5\rho g \sqrt{g\kappa^2} \sqrt{H} dH}{16 dy} = D_*(d)$$

(päris lihtne diferentsiaalvõrrand $H(y)$ suhtes)

$$H(y) = \left[\frac{24D_*(d)}{5\rho g \sqrt{g\kappa^2}} y + C \right]^{2/3} \quad y=0 \quad C=0$$

$$H(0) = 0$$

$$H(y) = \left[\frac{24D_*(d)}{5\rho g \sqrt{g\kappa^2}} \right]^{2/3} y^{2/3} = A(d)y^{2/3} \quad A(d) - \text{mastaabi-} \\ \text{kordaja (-tegur)}$$

2/3 astmeseaduse head ja vead

- (+) profiil on nõgus nagu looduslikud rannaprofiilidki
- (- i) rannajoonel on profiili kalle lõpmatu suur
- (- ii) et parameeter pole dimensioonitu (mis raskendab saadud tulemuste füüsikalist interpretatsiooni)
- (- iii) saadud profiil sügavneb monotoonselt avamere suunas → veealuseid liivavalle ei saa kirjeldada
- (++)?? lihtne rakendada praktiliste ülesannete lahendamisel
- (+++) klappib hästi tegelikkusega

Homogeenne lainete energia dissipatsioon mere pinnauhiku kohta

lainenergia voo P muutus mingi sügavusega H kohas mere pinnauhiku kohta (ilma tegurita $1/H$) $\frac{dP}{H dy} = -D_*(d)$ energia dissipatsiooni intensiivsus Sõitub vaid terasuurest

(1) Rand on tasakaalus → sellise intensiivsusega turbulents (keskmiselt!) veel ei liiguta setteosakesi

(2) Energia dissipatsioon on homogeenne

$$E = \frac{1}{8} \rho g h^2$$

$$P = Ec_g$$

$$c_g = \sqrt{gH}$$

$$h = \kappa H$$

$$\frac{d(\rho g \kappa^2 H^2 \sqrt{gH})}{8dy} = -D_*(d)$$

$$h(y) = A_2(d)y^{2/5}$$

Homogeenne nihkepinge merepõhjas

- Baseerub lainete kiirguspinge (wave radiation stress) kontseptsioonil
- kirjeldab ainult sellist olukorda, mil lained saabuavad randa teatava nurga all
- Samuti astmeseadus 2/5 $H(y) = A_3(d)y^{2/5}$
- Tegelikusega klappib kehvemini kui 2/3 seadus
- 2/3 seadus klappib terasuurese $\sim 0,1$ mm kuni 30 cm jaoks

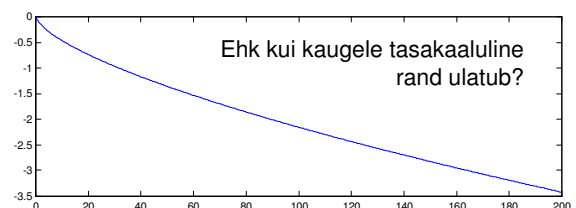
Mastaabitegur?

- Bowen (1980): tasakaaluline on profiil siis, kui rannaga risti suunatud netotransport=0
- Teatud üllatusena:

$$H(y) = A_4 y^{2/3} \quad A_4 = \left[\frac{(7.5w)^2}{g} \right]^{1/3}$$

- w on setteosakeste langemiskiirus
- ENAMASTI: $A=A(d)$ empiiriliselt
- $d=0.2$ mm → $A=0.1$ m(1/3)

Teoria piirid



Sulgemissügavus

- Tasakaaluline profiil ulatub nn. sulgemissügavuseni
- = avamere poolne piirsügavus, kus profiil kujuneb veel efektiivselt lainete mõjul
- Birkemeier (1985): $H^* = 1.75h_{s,0.137} - 57.9 \left(\frac{h_{s,0.137}}{gT_s^2} \right)$
- „ekstreemne” rannalähedane oluline lainekõrgus, mis esineb 12 tunni jooksul aastas
- lainete periood sellistes „ekstreemsetes” tingimustes

Kas saab lihtsamalt?

- Houston (1996): sulgemissügavus on ligikaudselt leitav aasta keskmise olulise lainekõrguse kaudu järgmiselt

$$H^* \approx 1.5h_{s,0.137} \approx 6.75h_s^a$$

- Sisuliselt on see seos ekstreemsete tormilainete ja lainetuse keskmiste parameetrite vahel
- Eesti jälle eriline: vähemalt Pirita jaoks ei toimi!!

Lainetuse parameetrid Pirital

- Aasta keskmine oluline lainekõrgus Pirita ranna erinevates sektorites 0,29–0,32 m
- $H^* = 1,96 - 2,16$ m.
- keskmiselt 12 tunni vältel aastas esineb Pirita ranna erinevates sektorites vähemalt 1,45–1,56-meetrine oluline lainekõrgus
- tüüpiline lainete periood ligikaudu 7 s
- $H^* = 2,36 - 2,57$ m.
- Üksikud tugevad ebasoodsast suunast puhuvad ning pikka aega kestvad tormid võivad modifitseerida ranna profiili märksa suurematel sügavustel, kui võiks järeldada lainetuse keskmiste parameetrite analüüsist

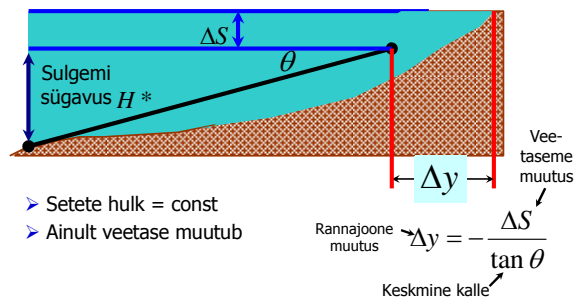
Tasakaalulise rannaprofiili leidmine

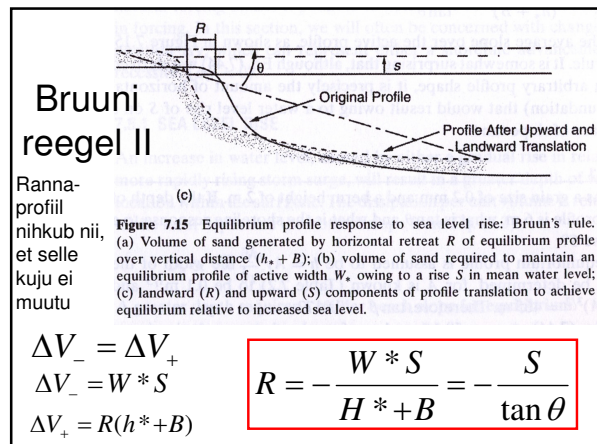
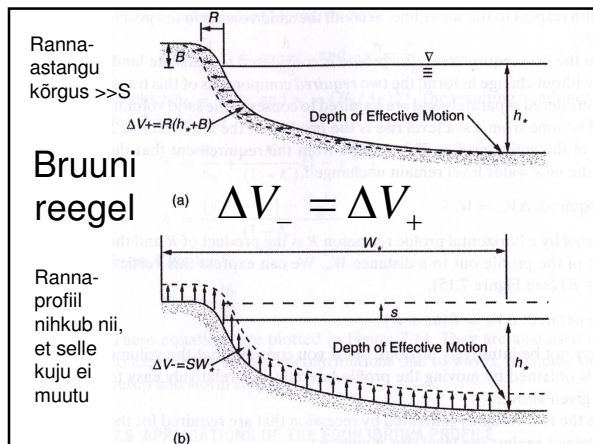
- Määratleda **sulgemissügavus**
 - Lainetuse modelleerimise või mõõtmise kaudu
 - Viimases hädas meretuule hinnangute ja lainetuse parameetrite nomogrammide kaudu
- Teha kindlaks **setete terasuurus MERES!!**
 - Üldjuhul vajalikud välitööd
 - Teiste (vananenud) andmete kasutamine on libe tee
- Leida **mastaabitegur** $A(d)$ kas tabelist või setete langemiskiiruse alusel
- Määrata **tasakaalulise rannaprofiili laius** W
- Praktiliste rakenduste jaoks leida **rannaprofiili keskmine kalle** $\tan \theta = H^*/W \approx 0.01$ (Pirita)

Tasakaalulise rannaprofiili rakendusi

- Mis juhtub merevee taseme tõusmisel (Bruuni reegel)
- Mis juhtub maakoore kerkimisel
- Kuidas määrata liiva defitsiiti konkreetses rannas?
- Kuidas dimensioneerida ranna täitmist?

Bruuni reegel (1962): tasakaaluline profiil nihkub kuju muutmata





Ülesanne:

Liivaterade keskmine diameeter 0.2mm
 Rannaastangu kõrgus 2m
 Sulgemissügavus 6 m
 Kui palju taganeb rand, kui vesi tõuseb 15 cm võrra?

Pirita: liivaterade keskmine diameeter 0.1mm ($A=0.063$)
 Rannaastangu kõrgus 1m
 Sulgemissügavus 2.5 m
 Kui palju peaks olema laienenud rand 1980-2000?

- Tasakaalulise ranna kontseptsioon ja selle kasutamine**
- Sõltub vaid setete terasuurusest ja lainetuse tingimustest 1-2x aastas
 - Eeldus: puudub transport rannaga risti
 - Veepiiri nihkumine: seotud vaid veepinna asendi muutumisega maakoore suhtes
 - Võimaldab hinnata liiva defitsiiti
 - Aluseks näiteks ranna täitmise dimensioneerimisel: murdlainete võõndisse paigutatud KOGU liiv jaotub seal ümber vastavalt TKR-le

Probleem rannajoonega I

Ülesanne: Leida tasakaalulise rannaprofiili $H = Ay^{2/3}$ kalle veepiiril

Probleem rannajoonega II

- Täpselt rannajoonel peaks seadusega $Ay^{2/3}$ kirjelduv nõlv olema vertikaalne, sest $\frac{dH}{dy} = \frac{2}{3} Ay^{-1/3}$ $dH(0)/dt = \infty$

Ülesanne: Kui laias veepiiri äärses ribas on tasakaalulise rannaprofiili kalle ebaadekvaatne?
 (Võtka näiteks $d=0.2$, $A=0.1$)

Probleem rannajoonega III

- Täpselt rannajoonel peaks seadusega $Ay^{2/3}$ kirjelduv nõlv olema vertikaalne, sest $\frac{dH}{dy} = \frac{2}{3}Ay^{-1/3}$ $dH(0)/dt = \infty$
- Probleem avaldub vaid paari meetri laiusel ribas, sest $d=0.2$, $A=0.1$,
- 2,4 m** kaugusel rannast, **18 cm** sügavuses vees on rannanõlva kalle 1/20 ehk ligikaudu 5°
- seega 2/3 astmeseadus adekvaatne kogu ülejäänud tasakaalulise rannaprofiili ulatuses

Probleem rannajoonega IV: lahendus

Kaine mõistus: väga järsku profiili tasandab gravitatsioonijõud, mille mõju esmases lähenduses ~rannanõlva kalle

laineenergia voo P muutus mingi sügavusega H kohas vee ruumalaühiku kohta (väljendab tegur $1/H$) $\frac{1}{H} \frac{dP}{dy} = D_*(d) - Bg \frac{dH}{dy}$ energia dissipatsiooni intensiivsus sõltub terasuurusest JA rannanõlva kaldest

Rand on tasakaalus \rightarrow sellise intensiivsusega turbulents (keskmiselt!) veel ei liiguta setteosakes; energia dissipatsioon on homogeenne

$$E = \frac{1}{8} \rho g h^2 \quad \frac{5}{24} \rho g \sqrt{g} \kappa^2 \frac{dH^{3/2}}{dy} + Bg \frac{dH}{dy} = D_*(d)$$

$$P = E c_g$$

$$c_g = \sqrt{gH}$$

$$h = \kappa H$$

$$H^{3/2} + \frac{Bg}{D_*} A^{3/2} H = A^{3/2} y$$

Tasakaalulise profiili kuju rannajoonel

$$H^{3/2} + \frac{Bg}{D_*} A^{3/2} H = A^{3/2} y \quad \text{Kuupvõrrand } \sqrt{H} \text{ jaoks.}$$

- Väga madalas vees võrrand lihtsustub
- kui $H \rightarrow 0$, on $H^{3/2} = H \sqrt{H} \ll H$.
- Päris veepiiri lähistel domineerib lineaarliige
- Rannaprofiil seal on lineaarne $H(y) = \frac{D_*}{Bg} y$
- nii, nagu see looduses ka tavaliselt ongi (~1/12)
- rannaprofiili kallet veepiiri juures on lihtne mõõta
- ainult A väärtus võib olla teistsugune

Tasakaalulise ranna kontseptsioon ja selle kasutamine

- Sõltub vaid setete terasuurusest ja lainetuse tingimustest 1-2x aastast
- Eeldus: puudub transport rannaga risti
- Veepiiri nihkumine: seotud vaid veepinna asendi muutumisega maakoore suhtes
- Võimaldab hinnata liiva defitsiiti
- Aluseks näiteks ranna täitmise dimensioneerimisel: murdlainete võõndisse paigutatud KOGU liiv jaotub seal ümber vastavalt TKR-le