

HARJUTUS 5

7. Vee selitamine

Vee selitamine on tahke-vedeliksegude lahutamine (separeerimine) gravitatsioonilise settimise teel eesmärgiga kõrvaldada veest sadestuvad heljuvained.

Settimise rakendused vee puhastustehnoloogias on järgmised:

- Pinnavee selitamine liivafiltrites enne puhastamist,
- Koaguleeritud või flokuleeritud vee selitamine enne liivfiltrimist,
- Töödeldud vee selitamine raua- või mangaaniärastusel.

Settimine on üks esimesi vee- ja reoveepuhastuses kasutatud operatsioone. Nii vee- kui ka reoveepuhastuses kasutatavate setitite tööpõhimõte on sama.

Settimisprotsessi võib jagada nelja tüübiks:

- I tüüp - diskreetne settimine (üksikute osakeste vaba settimine)
- II tüüp - flokkide settimine (flocculent settling)
- III tüüp - takistatud settimine (hindered settling)
- IV tüüp - muda settimine (sette tihenemine, *compression settling*)

7.1. Üksikute osakeste settimine ehk vaba settimine

Vaba settimine on üksikute osakeste (mitte flokkide) settimine lahjas suspensioonis.

Näiteks, pinnavee settimine või liivaosakeste settimine liivapüünises.

Vabal settimisel on liikumapanev jõud F_I , mille toimetel osake liigub, raskusjõu F_G ja üleslükkejõu F_A vahe

$$F_I = F_G - F_A = (\rho_s - \rho)gV, \quad (7.1)$$

kus ρ_s ja ρ on vastavalt osakese ja teda ümbritseva keskkonna tihedus, V – osakese ruumala.

Keskkonna poolt osakesele avaldatav **takistusjõud** F_D on vastavalt Newtoni seadusele

$$F_D = C_D A_c \rho (\omega_s^2 / 2), \quad (7.2)$$

kus F_D on takistusjõud, C_D – takistuskoeffitsient (sõltub Re arvust), A_c – osakese projektsiooni pindala voolu suunaga risti oleval pinnal, ρ – vedeliku tihedus ja V_s – settimiskiirus.

Settimise algmomendil osake liigub teatud kiirendusega. Kiiruse suurenemisel kasvab keskkonna takistus ja vastavalt väheneb kiirendus. Teatud hetkel takistusjõud F_D saab võrdseks jõuga, mille toimetel osake liigub s.o ($F_G - F_A$), saabub **dünaamiline tasakaal**.

Alates sellest hetkest osake liigub *ühtlaselt*, püsiva kiirusega. **Seda kiirust ω_s nimetatakse osakese settimiskiiruseks e Stokes'i kiiruseks.**

Settimiskiirust on võimalik avaldada liikuvale osakesele mõjuvate jõudude võrdsuse tingimusest,

$$F_I = F_D \quad (7.3)$$

$$(\rho_s - \rho)gV = C_D A_c \rho (\omega_s^2 / 2),$$

kust tuletatakse **avaldis osakese settimiskiiruse** arvutamiseks

$$\omega_s = (2Vg(\rho_s - \rho)/C_D A_c \rho)^{0,5} \quad (7.4)$$

Sfääriliste, kerakujuliste osakeste korral avaldub settimiskiirus järgmiselt
(*Newtoni võrrand, mis kehtib kõikides settimisrežiimides*)

$$\omega_s = (4gd(\rho_s - \rho)/3C_D)^{0,5} \quad (7.5)$$

ehk

$$\omega_s = (4gd(S_s - 1)/3C_D)^{0,5}, \quad (7.6)$$

kus S_s on osakeste suhteline tihedus.

(Valemi (7.5) tuletamiseks on valemis (7.4) tehtud järgmised asendused:

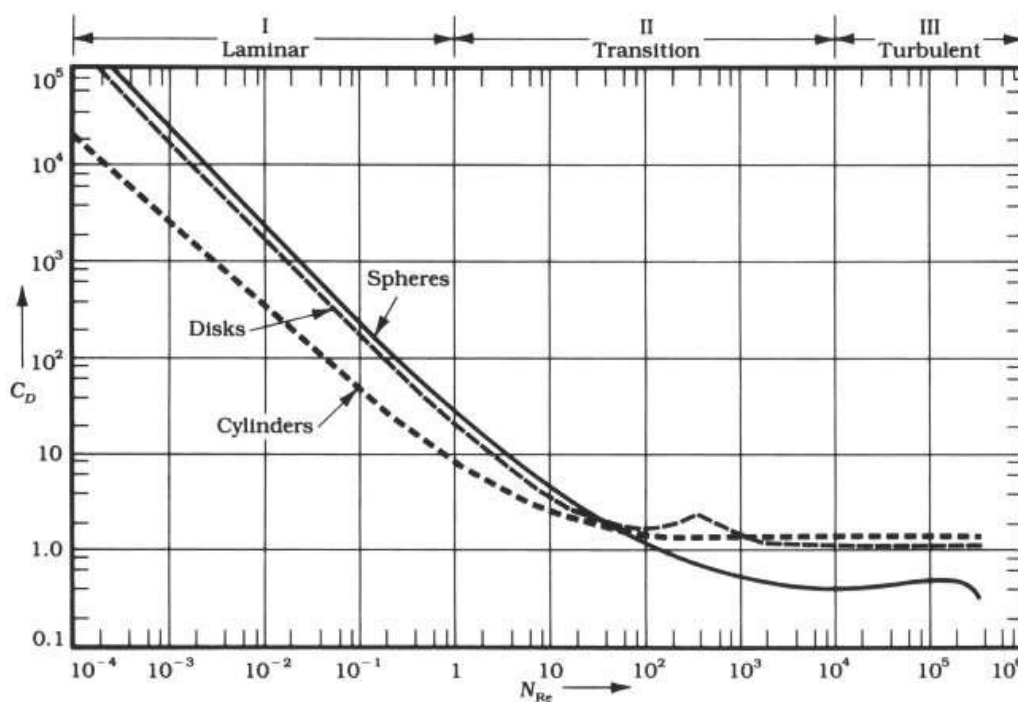
kera ruumala $V = (\pi/6)d^3$ ning projektsiooni pindala $A_c = (\pi/4)d^2$)

Takistuskoeffitsiendi (C_D) väärtus sõltub vedeliku voolamise režiimist. Joonisel 7.1 on esitatud takistuskoeffitsiendi sõltuvused Reynoldsi arvust N_{Re} erineva kujuga osakeste jaoks.

Modifitseeritud Re arv settimisprotsessi jaoks on järgmine

$$Re = N_{Re} = \omega_s d / \nu = \omega_s d \rho / \mu \quad (7.7)$$

kus ω_s on sadenemiskiirus, d on osakese diameeter, ρ on keskkonna tihedus, ν on kinemaatiline viskoossus ja μ - keskkonna viskoossus.



Joonis 7.1. C_D sõltuvus N_{Re} -st (Reynolds and Richards, 1996).

Üksiku osakese settimisrežiimid

On tehtud kindlaks, et eksisteerivad järgmised üksiku osakese sadenemise režiimid.

Laminaarne režiim $Re < 1$

$$C_D = 24/N_{Re} \quad (7.8)$$

Laminaarsel voolamisel väikeste voolamise kiiruste ja osakeste väikeste mõõtude juures on keha ümbritsetud vedeliku piirkihiga ning voolamine ümber keha toimub sujuvalt. Energiakaod on tingitud hõõrdetakistusest.

Üleminekurežiim $N_{Re} = 10 - 10^4$

$$C_D = 24/N_{Re} + 3/N_{Re}^{0,5} + 0,34 \quad (7.9)$$

Turbulentse voo tekkimisel omandavad järjest suuremat osa inertsijõud. Nende toimet piirkiht rebitakse keha pinnalt eemale, vahetult keha taga rõhk väheneb ja seal tekivad keerised. Seejuures rõhkude vahe voolamise suhtes keha esipinnale ja tagumisele pinnale suureneb.

Turbulentne voolamine $N_{Re} > 10^4$

$$C_D = 0,4 \quad (7.10)$$

Teatud Re väärtusest alates väljakujunenud turbulentsses režiimis võib hõõrdetakistust mitte arvestada, kuna valdavaks jõuks muutub takistusjõud keha esipinnal.

Settimiskiirus laminaarses režiimis

Laminaarse voolamise korral takistuskoeffitsient

$$C_D = 24/N_{Re} = 24\mu/(\omega_s d \rho). \quad (7.11)$$

Asendades selle võrrandi Newtoni võrrandisse, saame järgmise avaldise

$$\omega_s = (\omega_s d^2 \rho g (S_s - 1) / 18\mu)^{0,5},$$

mida teisendades saame Stokes'i võrrandi (kehtib, kui $N_{Re} < 0,5$):

$$\omega_s = d^2 \rho g (S_s - 1) / (18\mu)$$

NB! Kui osakese diameter väheneb 2 korda, siis settimiskiirus väheneb neli korda!

Seega settimiskiirus ω_s laminaarses režiimis arvutatakse Stokes'i valemiga

$$\omega_s = d^2 \rho g (S_s - 1) / (18\mu) \quad (7.12)$$

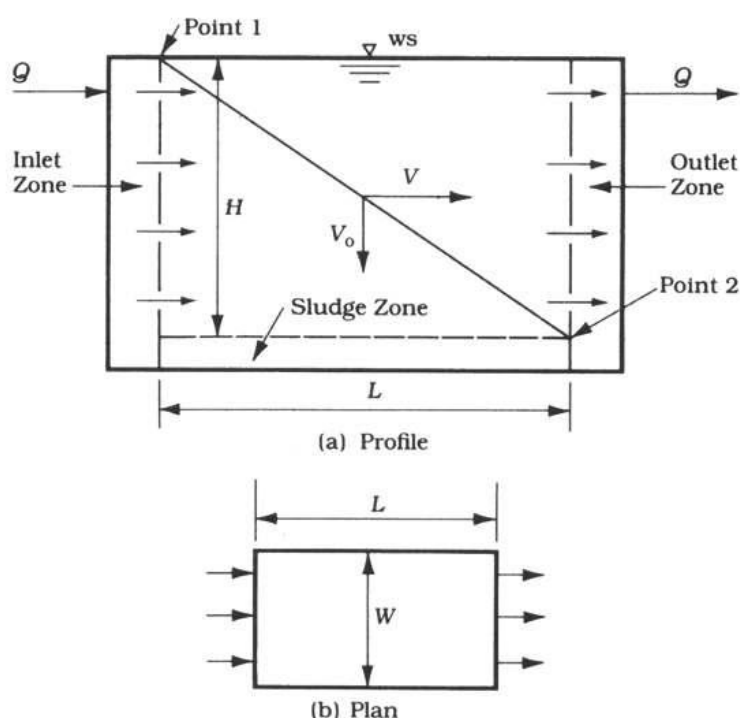
7.2. Ideaalsetiti projekteerimine

Määravateks parameetriteks on sadenemiskiirus, vee viibeaeg aparaadis ja saadud osakeste suurus.

Ideaalse setiti projekteerimisel tehakse järgmised eeldused:

- Settimisrežiim on I tüüpi – osakeste vaba settimine
- Setitisse siseneva voolu ühtlane jaotus
- Setitist väljuva voolu ühtlane jaotus
- Setitis on kolm tsooni – sisenemis-, väljumis- ja settetsoon
- Sisenemistsoonis on osakeste ühtlane jaotus kogu kõrguses
- Osakesed, mis sisenevad settetsooni, jäävad sinna, osakesed, mis sisenevad väljumistsooni eemaldatakse sealt.

Joonisel 7.2 on esitatud ideaalnelinurksetiti skeem.



Joonis 7.2. Ideaalnelinurksetiti (Reynolds and Richards, 1996)

Settimistsooni vee pinnale sattunud osakeste **horisontaalsuunaline kiirus on V ning vertikaalsuunaline settimiskiirus on V_0 .**

V_0 on kiirus, millega settib kõige väiksema suurusega osake, mis 100%-liselt kõrvaldatakse.

See tähendab, kui setitisse siseneb vee pinnal punktis 1 sellise suurusega osake, siis tema liikumise trajektoor vastab joonisel kujutatud trajektoorige ning osake satub settetsooni punktis 2, mis asub allavoolu lõpus. Kui osake satub settimistsooni mingil teisel kõrgusel, siis liikudes piki setitit jõuab ta kindlasti settetsooni ning kõrvaldatakse.

Aeg, mille jooksul osake viibib settetsoonis (viibeaeg), on võrdne kõrguse H ja settimiskiiruse jagatisega

$$t = H/V_0. \quad (7.13)$$

Teiselt poolt on viibeaeg võrdne pikkuse L ja horisontaalsuunalise kiiruse jagatisega

$$t = L/V. \quad (7.14)$$

Horisontaalsuunaline kiirus omakorda avaldub mahtkulu (voolukiiruse) ja setiti rõhtristlõike pindala kaudu järgmiselt

$$V = Q/HW. \quad (7.15)$$

Seega avaldub viibeaeg järgmiselt

$$t = LWH/Q, \quad (7.16)$$

kuna LWH on setiti ruumala V' , siis **viibeaeg on**

$$t = V'/Q = LWH/Q = H/V_0. \quad (7.17)$$

Võrrandist (3.17) saame järgmise **avaldise settimiskiiruse jaoks**

$$V_0 = \omega_s = Q/LW$$

ehk

$$V_0 = Q/A_p = \text{hüdrauliline pinnakoormus, m}^3/(\text{ööp m}^2),$$

kus A_p on setiti rõhtristlõike pindala.

Seega hüdrauliline pinnakoormus on ekvivalentne kiirusega, millega settib kõige väiksema suurusega osake, mis 100%-liselt kõrvaldatakse.

Sama kehtib ka ringsetiti kohta.

Võrrand $Q = A_p V_0$ näitab, et osakeste settimisel tootlikkus ei sõltu setiti sügavusest.

Põhiline järeldus: Osakeste paremaks eemaldamiseks on vaja vähendada voolukiirust või suurendada setiti rõhtristlõike pindala.

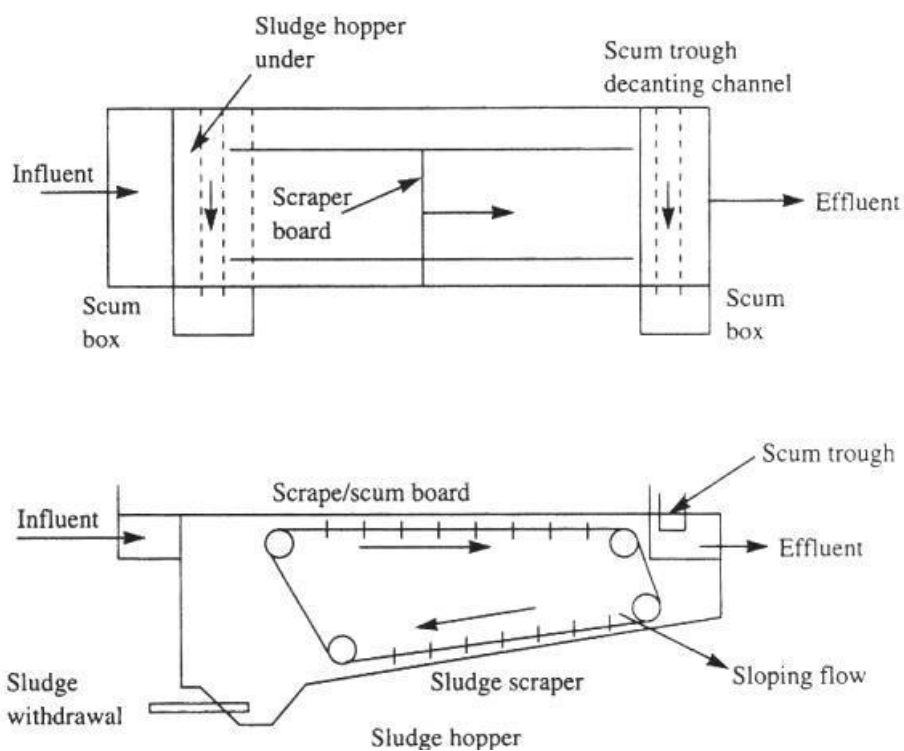
NB! Ehkki ideaalse setiti analüüs on teoreetiline, annab see võimaluse setitite arvutamiseks.

Setitite projekteerimisel kasutatavate võtmeperameetrite tüüpilised väärtused on järgmised:

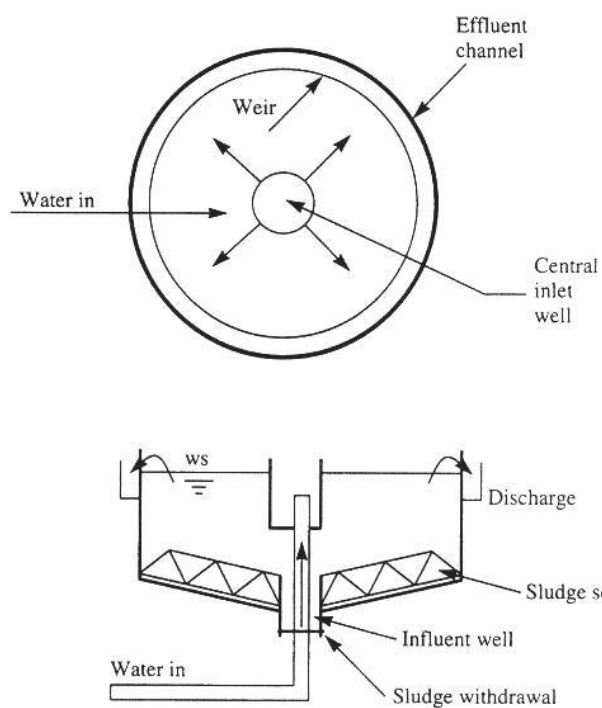
- Hüdrauliline pinnakoormus $\sim 20\text{-}35 \text{ m}^3/(\text{ööp m}^2)$
- viibeaeg $\sim 2\text{-}8 \text{ h}$
- ülevoolukiirus (weir overflow rate) $6\text{-}14 \text{ m}^3/(\text{h m})$

Need väärtused sõltuvad nii toorvee kui ka koaguleeritud toorvee korral vee iseloomust.

Joonistel 7.3. and 7.4. on toodud nelinurksetiti ning ringsetiti skeemid.



Joonis 7.3. Nelinurksetiti skeem (Kiely, 1997).



Joonis 7.4. Ringsetiti skeem (Kiely, 1997).

Ülesanne 7.1.**VEE SELITAMINE**

Määrata ruudukujulise I tüüpi setiti mõõtmed, kui selles setitatakse 36400 m^3 toorvett ööpäevas ning pinnakoormus on $12 \text{ m}^3/\text{ööp}/\text{m}^2$ ja viibeaeg on 6 tundi. Samuti määrata üldine eraldusaste, kui osakeste eritihedus on 1,15 ning on teada osakeste jaotus suuruse järgi.

Tabel 1. Osakeste jaotus suuruse järgi

Osakese suurus, mm	0,1	0,08	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01
Fraktsiooni osa, %	10	15	35	65	90	98	100
ω_s, mm/s							
Re							