

Juha Laasonen

# Saastuneiden sedimenttien käsittelymahdollisuudet Kymijoessa ja kenttäkokeiden suunnittelu





VTT JULKAISUJA–PUBLIKATIONER 843

# **Saastuneiden sedimenttien käsittelymahdollisuudet Kymijoessa ja kenttäkokeiden suunnittelu**

Juha Laasonen

VTT Valmistustekniikka



---

VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS  
ESPOO 2000

ISBN 951-38-5022-6 (nid.)

ISSN 1235-0613 (nid.)

ISBN 951-38-5025-0 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0857 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2000

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Valmistustekniikka, Laiva- ja konetekniikka, Tekniikantie 12, PL 1705, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 0619

VTT Tillverknings teknik, Skepps- och maskinteknik, Teknikvägen 12, PB 1705, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 0619

VTT Manufacturing Technology, Maritime and Mechanical Engineering,  
Tekniikantie 12, P.O.Box 1705, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 0619

Tekninen toimitus Leena Ukoskoski

Tekstinvalmistus Arja Grahn

Otamedia Oy, Espoo 2000

Laasonen, Juha. Saastuneiden sedimenttien käsittelymahdollisuudet Kymijoen ja kenttäkokeiden suunnittelu. Espoo 2000. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja – Publikationer 843. 115 s. + liitt. 4 s.

**Avainsanat** contaminated sediments, sediment treatment, dredging, fluvial environment, sediment transport, remediation, hydraulic engineering, rivers, field experiments

## Tiivistelmä

1990-luvun alkupuolella havaittiin Kymijoen sedimenttien sisältävän suuria pitoisuuksia organoklooriyhdisteitä, erityisesti myrkyllisiä PCDD- ja PCDF-yhdisteitä (dioksiini- ja furaaniyhdisteitä). Pohjaeläimissä havaittiin kehitysvaurioita. Kymijoen pohjasedimentissä PCDD- ja PCDF-yhdisteiden kokonaismäärän on arvioitu olevan 4 000–5 000 kg, joka jakautuu likimain tasan Kuusankoski–Keltti-välin, Kymijoen alaosan ja merialueen kesken. Lisäksi Kuusankosken ja Keltin välillä elohopeapitoisuudet ylittävät saastuneen maan raja-arvon 5 mg/kg.

Tulva-aukkojen juoksutukset aiheuttavat eroosiota Kuusankosken voimalaitoksen alapuolella. Eroosion suuruuden ja laajuuden selvittäminen edellyttää hydrologisia ja numeerisia virtausmallilaskentoja vesivoimakoneistojen käyttöhäiriötarkastelujen lisäksi.

Ruoppaajatarkasteluissa valittiin Kymijoen sedimentinäytteiden perusteella kolme raekokoa,  $d_{50}$ : 20, 60 ja 110  $\mu\text{m}$ . Partikkelin halkaisijan perusteella valitulla leikkausjännitysalueella (0,3–0,9  $\text{N/m}^2$ ) kriittinen virtausnopeus tulee olemaan 0,2–0,4 m/s.

Ruoppaustyön aiheuttama kiintoaineen vapautuminen arvioitiin laitteiden työkiertojen perusteella, ja sen laskeminen voidaan jakaa seuraaviin osatarkasteluihin:

- kauhan laskeutumiseen perustuva kiintoaineen irtoaminen
- kauhan ollessa pohjalla pilarin eroosiotarkastelun perusteella
- kauhan nostosta aiheutuva kiintoaineen irtoaminen uoman pohjasta
- avoimesta kauhasta tapahtuva ruoppausmassojen karkaaminen.

Suljetulla kahmarikauhalla ja pumppukauhalla liettyvät pienimmät kiintoainemäärät ruopattua m<sup>3</sup>:ä kohti. Virtausnopeuden ollessa suurempi kuin 0,2 m/s irtoavan kiintoaineen määrä alkaa kasvaa voimakkaasti. Kauhan nopeudella on suuri vaikutus vapautuvan kiintoaineksen määrään.

Teoreettisen tarkastelun perusteella lasketut vapautuvat kiintoainepitoisuudet ovat pienempiä (max. 20–45 mg/l) kuin kirjallisuudessa esitetyt. Tarkastelun perusteella voidaan kuitenkin päätellä ruoppausmenetelmien keskinäinen paremmuus. Teoreettisen tarkastelun perusteita voidaan tarkentaa tuulitunnelissa tehtävillä kokeilla.

Kuusankosken ja Keltin saastuneiden sedimenttien ruoppauksessa (140 000 m<sup>3</sup>) kiintoainetta on arvioitu liettyvän 5–10 tonnia pumppukauhaa ja suljettua kahmarikauhaa käyttäen, noin 30 tonnia suljettua kuokkakauhaa käyttäen ja noin 40 tonnia avointa kuokkakauhaa käyttäen. Yliruoppauksesta johtuen kiintoainemäärät voivat olla moninkertaiset. Keskimääräisten pitoisuuksien perusteella dioksiinia ja furaania vapautuu 0,4–2,8 kg ja elohopeaa noin 40–270 g ruoppauksesta riippuen.

Ruoppauksen suorituksessa ammattitaidolla on erittäin suuri merkitys kiintoaineen irtoamiseen. Tarpeettoman suurella kaivussyvyydellä löyhdytetään pohjan maa-ainesta, jolloin myös irtoavan kiintoaineksen määrä kasvaa. Esimerkiksi 5 cm:n ylikavulla saadaan kiintoainemäärän lisäykseksi 40–50 g/s, joka on 4–5-kertainen teoreettisesti arvioituihin verrattuna. Toisaalta kauhan kaivuvastus suuren vesipitoisuuden omaavassa sedimentissä on pieni, mikä vaikuttaa ruoppauksen tarkkuuteen. Lisäksi Kymijoella uitetut pohjaan painuneet tukit saattavat aiheuttaa ikävän yllätyksen kiintoaineen irtoamisen suhteen.

Jos laajamittaiseen saastuneiden sedimenttien ruoppaukseen päädytään, on ruoppaus työ suoritettava syksyllä pienten virtaamien aikaan.

# Alkusanat

Kymijoen saastuneiden sedimenttien käsittelymahdollisuuksia koskeva tutkimus toteutettiin seurantaryhmän ohjauksessa, johon kuuluivat yli-insinööri Kari Lampela, kehitysinsinööri Erkki Mykkänen, erikoistutkija Matti Verta sekä tutkimusinsinööri Olli Malve Suomen ympäristökeskuksesta. Seurantaryhmä on kommenteillaan ja ohjauksellaan parantanut tutkimustyön sisältöä. Lisäksi tekijän ja seurantaryhmän jäsenten kanssa käydyt kahdenkeskiset keskustelut ovat olleet antoisia ja ne ovat osaltaan syventäneet tutkimusta. Tekijä haluaa kiittää seurantaryhmän jäseniä hyvästä yhteistyöstä.

Kymijoelle Myllykoskelle ja Kuusankoskelle suoritettiin 6.4.2000 maastokäynti koeruoppausalueiden kartoittamiseksi. Maastokäyntiä varten saatiin Kaakkois-Suomen ympäristökeskukselta käyttöön vene. Tekijä haluaa kiittää Kaakkois-Suomen ympäristökeskusta ja veneen kuljettajaa Lasse Rajalaa hyvin onnistuneista järjestelyistä.

Tätä selvitystä varten on käyty keskusteluja ja saatu lähdeaineistoa. Tekijä haluaa kiittää erikoistutkija Timo Huttulaa ja tutkimusmestari Jari Vileniä Pirkanmaan ympäristökeskuksesta, dipl.ins. Juha-Pekka Triipposta Lounais-Suomen ympäristökeskuksesta sekä tutkija Tuula Kohosta Turun yliopiston Saaristomeren tutkimuslaitoksesta hyvästä yhteistyöstä.

Espoo, 19.5.2000

Tekijä

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
2. Kymijoen olosuhteet.....	10
2.1 Johdanto.....	10
2.2 Haitallisten aineiden pitoisuudet Kymijoessa.....	11
2.3 Pohjan sedimenttien ominaisuudet ja haitallisten aineiden sitoutuminen.....	16
2.3.1 Flokkien muodostuminen.....	17
2.3.2 Kymijoen sedimenttien raekoko.....	18
2.3.3 Elohopea.....	22
2.3.4 PCDD/F-yhdisteet.....	23
2.4 Kymijoen virtaamat ja virtausnopeudet.....	23
3. Saastuneiden alueiden käsittelymahdollisuudet.....	26
3.1 Ei toimenpiteitä.....	26
3.2 Peittäminen.....	28
3.3 Ruoppaus.....	29
4. Saastuneiden sedimenttien ruoppaus- ja käsittelymahdollisuudet.....	30
4.1 Ruoppauksen toteutus.....	30
4.2 Ruoppausmenetelmät.....	30
4.2.1 Kauharuoppaajat (mechanical dredgers).....	32
4.2.2 Imuruoppaajat (hydraulic dredgers).....	34
4.2.3 Pneumaattiset ruoppaajat.....	42
4.3 Ruoppausmassojen siirto.....	43
4.4 Ruoppausmassojen läjitys.....	43
4.4.1 Vedenpoisto.....	44
4.4.2 Sedimentin seulonta.....	44
4.5 Saastuneiden sedimenttien (dioksiinit ja furaanit) käsittely.....	45
4.5.1 Kloorin poisto (dechlorination).....	45
4.5.2 Polttaminen (incineration).....	46
4.5.3 Liuottimilla uuttaminen.....	48



5. Sedimentin kulkeutuminen .....	49
5.1 Fysikaaliset perusteet .....	49
5.1.1 Turbulenttinen virtaus .....	49
5.1.2 Partikkelien liikkeellelähtö.....	50
5.1.3 Partikkelien laskeutumisnopeus .....	57
5.1.4 Suspension kulkeutuminen.....	59
5.1.5 Sedimentin kulkeutuminen.....	61
5.2 Sedimentin kulkeutuminen Kymijoessa .....	64
5.3 Irtoavan kiintoaineksen leviäminen .....	64
6. Ruoppaustyö virtaavassa vedessä ja sen vaikutus maa-aineksen irtoamiseen .	66
6.1 Aikaisemmat selvitykset .....	66
6.2 Kenttäkokeessa tarkasteltavat ruoppausmenetelmät .....	67
6.2.1 Avoin ja suljettu kuokkakauha.....	68
6.2.2 Pumppekauha.....	69
6.2.3 Suljettu kahmarikauha.....	70
6.2.4 Ruoppaajien työkierrat.....	70
6.3 Ruoppaajan vaikutus irtoavaan kiintoainekseen .....	71
6.3.1 Kymijoen sedimenttien ominaisuudet.....	71
6.3.2 Ruoppaajan kiinnittymisen vaikutus .....	75
6.3.3 Ruoppaajan vaikutus virtaustilaan .....	80
6.3.4 Ruoppaajien vertailu .....	84
6.3.5 Muut ruoppaajat .....	90
6.4 Kenttäkoesuunnitelma.....	91
6.5 Mallikoesuunnitelma.....	96
7. Toimintamallien vaikutusten arviointia .....	98
7.1 Kymijoen pienet paikallisruoppaukset (esim. laiturit, uimapaikat) .....	98
7.2 Tulvien, talviaikaisten hyytöjen ja jääpatojen vaikutukset .....	98
7.3 Kymijoen kanavointi.....	99
7.4 Ruoppausajankohdan valinta .....	100
8. Johtopäätökset.....	101
9. Yhteenveto .....	105
Lähdeluettelo .....	110

## LIITE



# 1. Johdanto

1990-luvun alkupuolella havaittiin Kymijoen sedimenttien sisältävän suuria pitoisuuksia organoklooriyhdisteitä, erityisesti myrkyllisiä PCDD- ja PCDF-yhdisteitä (dioksiini- ja furaaniyhdisteitä), sekä pohjaeläimissä olevan kehitysvaurioita. Vuosina 1996–1999 useat tutkimuslaitokset osallistuivat nk. KYPRO-projektiin, jossa tutkittiin Kymijoen pohjan tilaa. Tämän projektin tutkimustuloksia on esitetty Suomen ympäristökeskuksen julkaisussa 'Organoklooriyhdisteet ja raskasmetallit Kymijoen sedimentissä: esiintyminen, kulkeutuminen, vaikutukset ja terveysriskit'.

Suomen ympäristökeskus tilasi 7.2.2000 VTT Valmistustekniikalta selvityksen Kymijoen saastuneiden sedimenttien käsittelymahdollisuuksista. Työn tavoitteena oli arvioida erilaisten ruoppausmenetelmien liettämän kiintoaineen määrää virtaavassa vedessä. Teoreettisen tarkastelun lähtökohtana oli arvioida ruoppaustyöstä aiheutuva virtaustilan muutos. Virtaustilan muutoksen perusteella on määritetty paikallinen eroosio. Virtausnopeuden muutokset arvioitiin virtausopin (hydrauliikan) kokeellisesti määritettyjen yhtälöiden perusteella. Keväällä 2001 on tarkoitus suorittaa Kymijoella koeruoppaus, jolloin määritettyjä arvoja voidaan verrata teoreettisesti arvioituihin. Lisäksi tehtävänä on ollut arvioida tarvetta tehdä fysikaaliset mallikokeet Kymijoen sedimentin liikelehtö- ja eroosio-ominaisuuksien selvittämiseksi sekä osallistua kenttäkokeiden suunnitteluun. Työn tuloksia on tarkoitus käyttää hyväksi päätettäessä saastuneiden sedimenttien käsittelytavoista sekä arvioitaessa paikallisruoppausten ja suurempien perkausten vaikutuksia. Lisäksi työn tuloksia voidaan käyttää määrittäessä Kymijoen sedimentin kulkeutumisen laskentaohjelmien reunaehtoja.

## 2. Kymijoen olosuhteet

### 2.1 Johdanto

Kymijoen päähaara Pyhäjärven alapuolella on puunjalostus- ja paperiteollisuuden vaikutuspiirissä olevaa aluetta. Laajempi teollinen toiminta on alkanut 1800-luvun loppupuolell Voikkaan tehtailla (selluloosa, paperi ja puumassa) 1897, Kuusankosken paperitehtaalla ja puuhiomossa 1872 sekä selluloosatehtaassa 1887, Myllykosken puuhiomossa 1884 sekä Inkeröisten puuhiomossa 1872 (Blomqvist, 1911).

Sellun valkaisuissa muodostuvien yhdisteiden päästöjen määrä on pienentynyt 1980–1990-luvuilla lähes olemattomiin prosessimuutosten, biologisten puhdistuslaitosten ja pienentyneiden jätevesipäästöjen avulla. Kuitenkin joen ja suistoalueen pohjalietteessä on säilynyt vuosikymmenien kuluessa valkaisusta, kloorifenolituotannosta, limantorjunnasta ja puunsuojauksesta päässeitä organoklooriyhdisteitä ja elohopeaa (Verta et al., 1999).

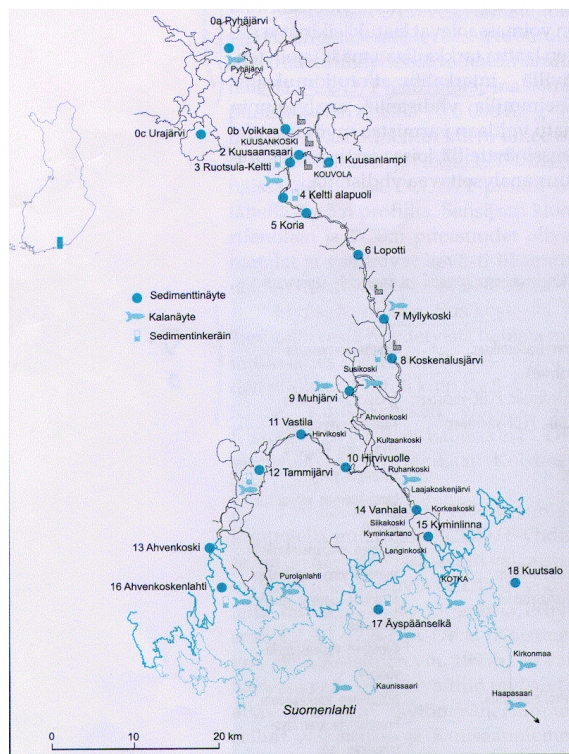
Sellun kloorivalkaisussa akuutisti suurimman myrkkynuorman muodostivat klooriyhdisteet, joista tärkeimpiä ovat polykloorifenolit (PCP), polykloorikatekolit (PCC), polyklooriguajakolit (PCG), polykloorivanilliinit (PVVan) ja polykloorisyringolit (PCSyr). Pääosa sellutehtaiden kloorifenoleista on sitoutuneena suurimolekyyliseen ainekseen ja osa niistä on varastoitunut vesistön sedimenttiin. Lisäksi kloorivalkaisussa muodostui kloorifenolieettereitä, joista myrkyllisten PCDD/F-yhdisteiden osuus on suhteellisen pieni muihin lähteisiin verrattuna (Verta et al., 1999).

Vuosina 1940–1984 Kuusankoskella valmistettiin yhteensä 23 780 tonnia puutavaran sinistymisen estoon käytettyä KY 5:tä, jonka pääkomponentti oli 2,3,4,6-tetrakloorifenoli (2,3,4,5-TeCP), sivukomponentit olivat pentakloorifenolia (PeCP) ja 2,4,6-trikloorifenolia (2,4,6-TCP) sekä ei-toivottuja sivutuotteita, kuten polykloorifenoksifenolia (PCPP) ja polyklooridifenyylieetteriä (PCDE). Valmistusprosessissa ei syntynyt jätevesiä. Kymijokeen on kulkeutunut liukenemattomia sivutuotteita pesuvesien mukana (5–30 kg/pesukerta kerran kuukaudessa), jolloin sakan määrä olisi noin 1,4–8,4 tonnia. Huomattava osa jokeen joutuneista yhdisteistä on päässyt peroksiditehtaan palossa vuonna 1960, jolloin Ky5:tä tuhoutui 2224 kg, fenolia 2 845 kg, hiilitetrakloridia 6 680 kg, klooria 160 kg ja lipeää 1 539 kg (Verta et al., 1999).

Kuusansaaren kloorialkalitehtaan elohopeapäästöt ovat alkaneet 1936 ja niiden suuruus vuosina 1950–1967 oli n 550 kg/a. Vuoden 1968 jälkeen kuormitus on vähentynyt nopeasti, ja vuonna 1977 päästiin alle 2 kg:n vuositason. Nykyisin kuormitus on alle 1 kg vuodessa. Lisäksi elohopeaa on käytetty massa- ja pape-riteollisuuden limantorjunnassa. Kymijoen alaosan elohopeakuormituksen on vuoden 1950 jälkeen arvioitu olleen yhteensä n. 31 tonnia. Kymijokeen pääs- syt historiallinen kuormitus lienee tätä hieman suurempi (Verta et al., 1999).

## 2.2 Haitallisten aineiden pitoisuudet Kymijossa

KYPRO-projektissa tutkittiin haitallisten aineiden pitoisuudet Kymijoen päähaaran eri osissa (Kuva 1). Sedimenttinäytteiden lisäksi tutkittiin kalanäytteitä ja arvioitiin sedimentin keräimillä (vajoava aines) joessa kulkeutuvien PCDD/F-yhdisteiden määrää.



Kuva 1. KYPRO-projektissa tutkittujen sedimentti-, kala- ja sedimentinkeräin- näytteiden keruupaikkojen sijainti (Verta et al., 1999).

### **Polyklooratut dioksiinit ja fenolit (PCDD/F) (Kuva 3a)**

Ympäristöministeriön PCDD/F-yhdisteille ehdottama saastuneen maan raja-arvo, 0,5 ng/g, ylittyy kaikilla mitatuilla jokialueilla. Suurimmat pitoisuudet ovat Kuusankosken ja Keltin välillä, ja pitoisuudet laskevat alavirtaan mentäessä. Rosenin ja muiden (1994) laatiman sedimentin PCDD/F-yhdisteiden pitoisuusluokituksen mukaan Kymijoen pitoisuudet sijoittuvat erittäin saastuneiden sedimenttien luokkaan (kokonaispitoisuus >100 ng/g) ja myrkyllisyyskvivalenttiarvonsa (I-TEQ) perusteella maailman eniten dioksiini- ja furaanisaastuneiden sedimenttien joukkoon (Verla et al., 1999).

### **Polyklooratut difenyylietterit (PCDE) (Kuva 3b)**

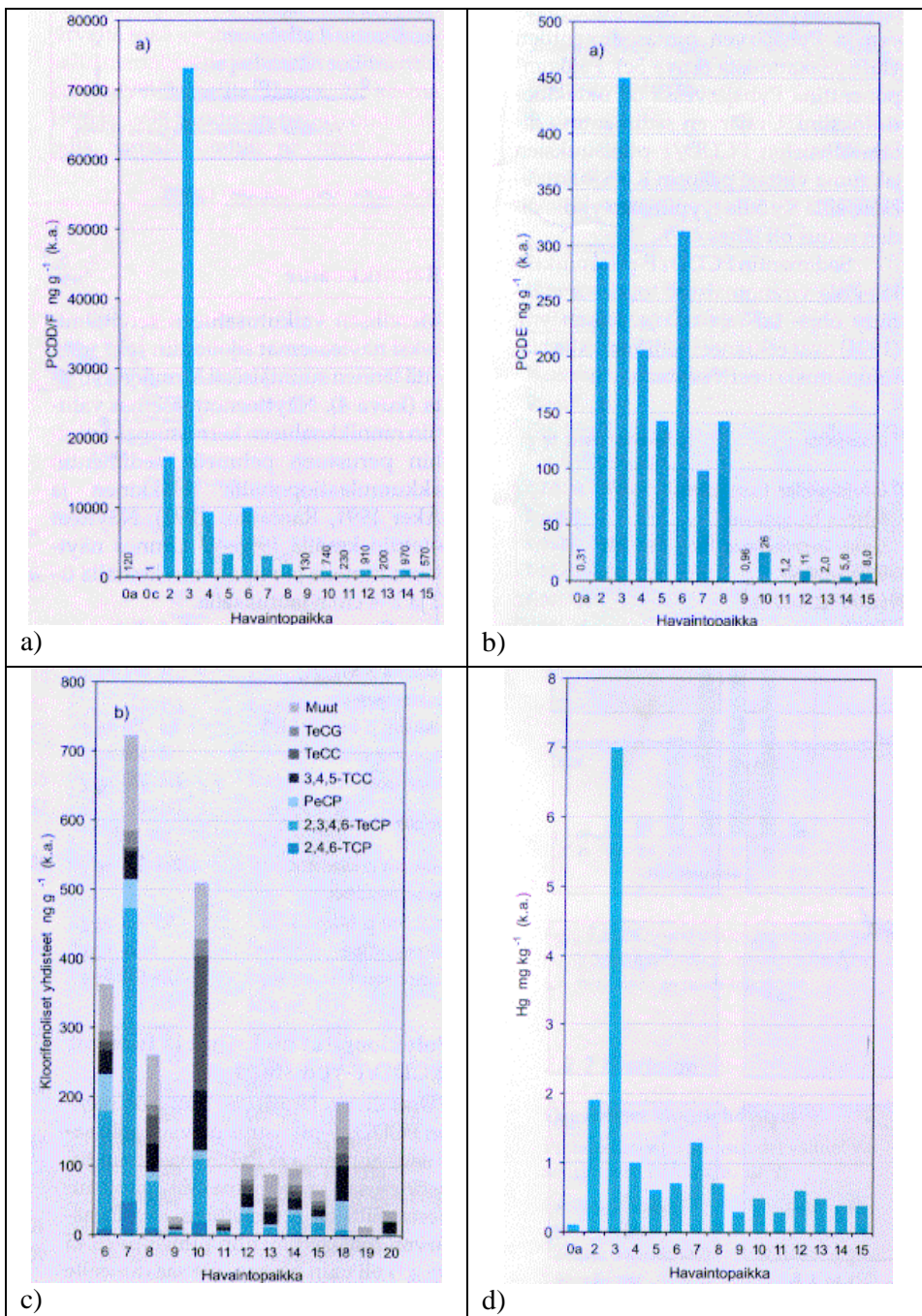
Kymijoen yläpuolisessa Pyhäjärven sekä Suomenlahden sedimentissä PCDE-yhdisteiden pitoisuudet ovat suuruudeltaan noin 0,3 ng/g, joka on alle tuhannesosa Kymijoen maksimipitoisuudesta Kuusankosken ja Keltin välillä. Pitoisuudet ovat suuria Anjalankoskelle asti (150–500 ng/g) ja alapuolella pitoisuudet ovat huomattavasti pienempiä (Verta et al., 1999).

### **Kloorifenoliset yhdisteet (PCP, PCG, PCC) (Kuva 3c)**

Kloorifenolit liukenevat enemmän veteen ja siten sitoutuvat vähemmän sedimenttiin kuin dioksiinityypiset yhdisteet. Lisäksi kloorifenolit hajoavat biologisesti. Kloorifenolien kokonaispitoisuudet olivat 20–700 ng/g, joka on suuruusluokaltaan samaa PCDE pitoisuuksien kanssa. Minkään kloorifenoliyhdisteen osalta ei ylitetty ympäristöministeriön raja-arvoja saastuneille raja-arvoille (Verta et al., 1999).

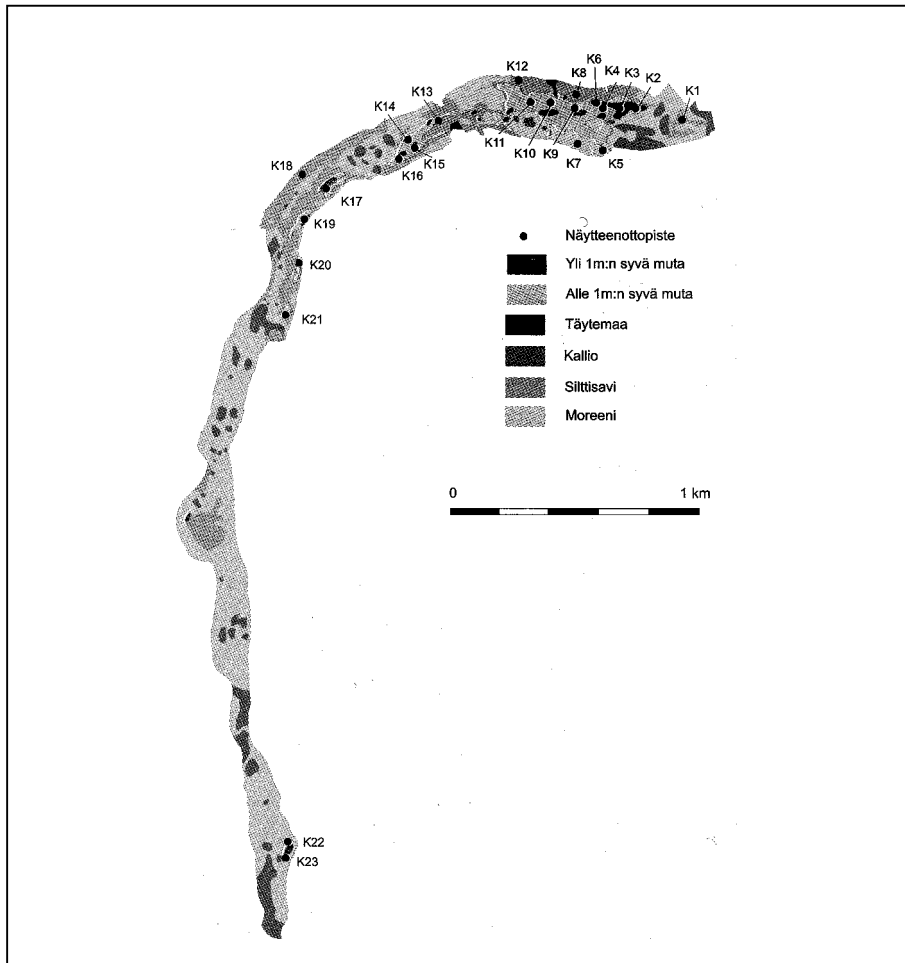
### **Elohopea (Kuva 3d, Kuva 5, Kuva 7)**

Elohopean saastuneen maan raja-arvo (5 mg/kg) ylittyy Kuusankosken ja Keltin välillä, jossa sedimentin pintakerroksen elohopeapitoisuus on 7 mg/kg (Kuva 3d). Elohopeapitoisuudet laskevat alavirtaan mentäessä. Kuusankosken ja Keltin voimalaitosten väliltä tehtiin tarkempi kartoitus (Kuva 5) ja syvemältä (0,5–2 m) otetuista näytteistä saastuneen maan raja-arvo ylittyi yleisesti (Kuva 7). Suurin havaittu pitoisuus oli 33 mg/kg (Verta et al., 1999).



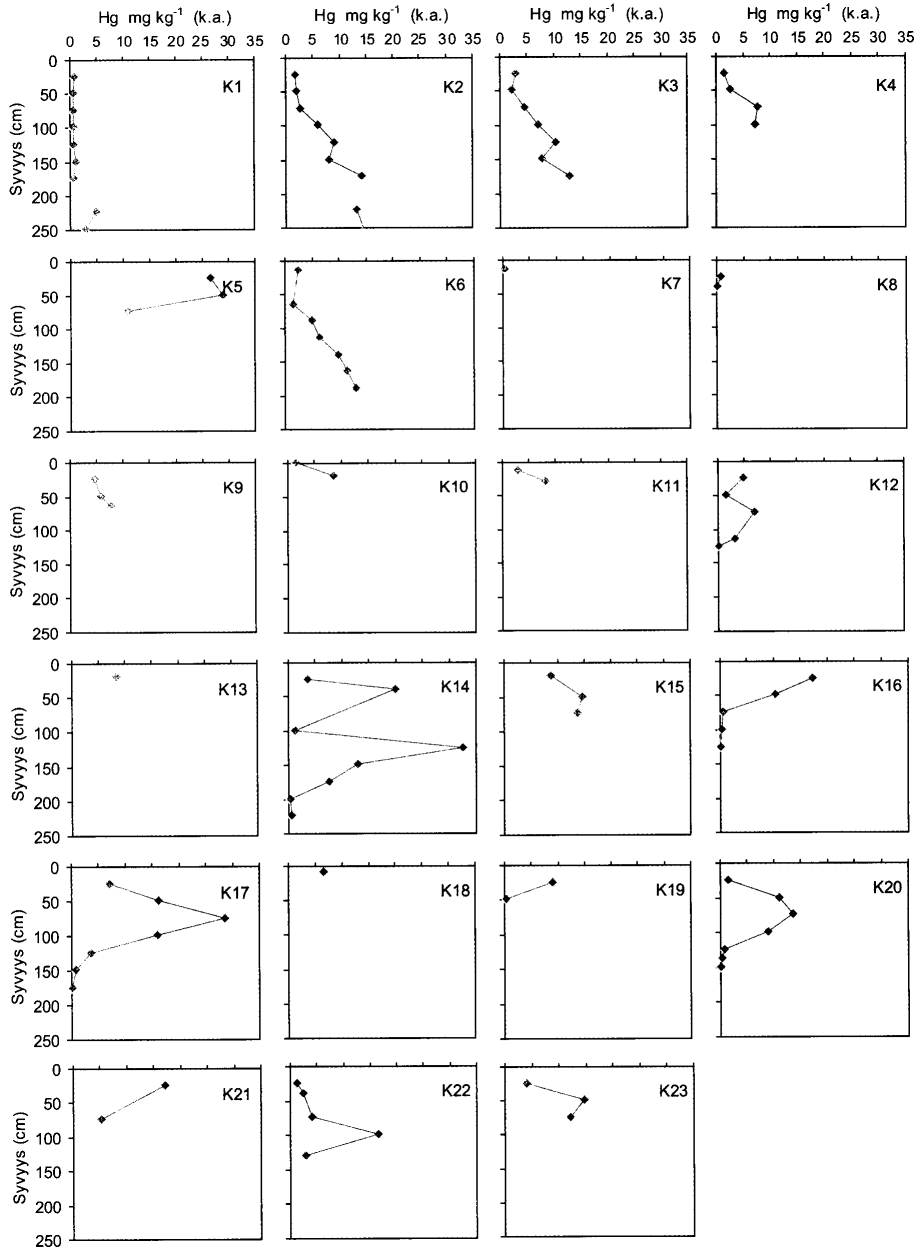
Kuva 3. PCDD/F-yhdisteiden a), polykloorattujen difenyylietterien b), kloorifenolien yhdisteiden c) sekä elohopeapitoisuudet d) sedimentin pintakerroksen (0–3 cm) kuiva-aineessa. Pisteiden sijainti esitetään kartassa (Kuva 1) (Verta et al., 1999).

Kontaminoituja sedimenttejä Kuusankosken ja Keltin välillä on arvioitu kaikuluotausten perusteella olevan 76 000–140 000 m<sup>3</sup>. Keskimääräisten pitoisuuksien perusteella laskien PCDD/F-yhdisteitä on arvioitu olevan sedimentissä 1 500–2 800 kg, mikä on noin kolmasosa yhdisteiden kokonaismäärästä (4 000–5 000 kg). Loppuosa on jakautunut likimain tasan Kymijoen alaosan ja edustan merialueen kesken (Verta et al., 1999).



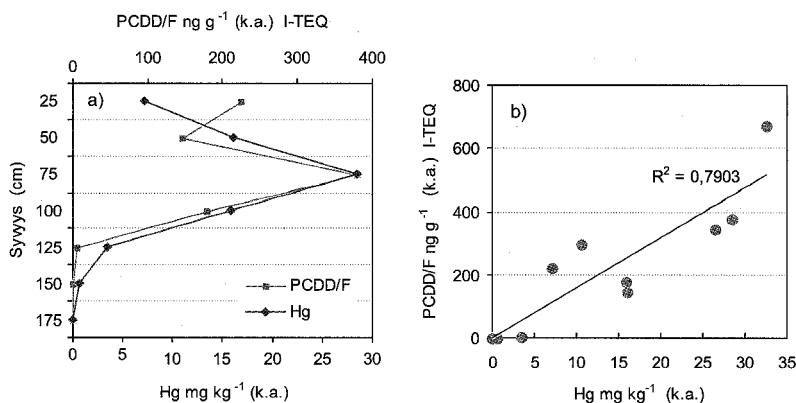
Kuva 5. Kuusankosken ja Keltin välisen alueen pohjan kaikuluotauskartoitus sekä kontaminaatiokartoituksen havaintopaikkojen sijainti (Verta et al., 1999).





Kuva 7. Kuusankosken ja Keltin välisen alueen elohopeapitoisuudet näytesyvyyden suhteen. Pisteiden sijainti esitetään kartassa (Kuva 5) (Verta et al., 1999).

Pohjasedimentissä elohopean ja PCDD/F-yhdisteiden korrelaatio on parempi kuin pintakerroksissa (Kuva 9). Pintasedimentissä on huomattavasti suurempia PCDD/F-yhdisteiden pitoisuuksia kuin elohopeapitoisuuksia (Verta et al., 1999).



Kuva 9. PCDD/F-yhdisteiden ja elohopean pitoisuudet ja niiden välinen riippuvuus Kuusankosken alapuolella pisteessä K14 (Verta et al., 1999).

Hurukselassa, Anjalankosken alapuolella, vuosina 1994–1998 tehtyjen mittausten perusteella elohopeapitoisuudet ovat olleet suuruudeltaan  $0,003 \mu\text{g/l}$ , joka on alle analyysiherkkyyden (Verta et al. 1999).

### 2.3 Pohjan sedimenttien ominaisuudet ja haitallisten aineiden sitoutuminen

Joissa ja järvissä merkittävimpiä epäpuhtauksien kuljettajia ovat suspensiohiukaset. Yleensä 90 % raskasmetalleista on sitoutunut suspensioainekseen ja sedimenttiin. Geokemikaalisen kulkeutumisen merkittävimpiä komponentteja ovat savi, siltti, mangaanin ja raudan hydroksidit, orgaaninen hiili ja biologinen materiaali (Droppo & Ongley, 1992, Calmano et al., 1993).

### 2.3.1 Flokkien muodostuminen

Suspendoituneen sedimentin hienoaines sisältää yhdistyneitä partikkeleita (flokkeja), joiden laskeutumisnopeus on erilainen kuin yksittäisten partikkelien. Flokkien syntymiseen vaikuttavia mekanismeja ei täysin tunneta. Meriympäristössä flokkien syntyminen on riippuvainen elektrokemiallisesta flokkulaatiosta, joka liittyy korkeaan suolapitoisuuteen. Elektrokemiallinen flokkulaatio on merkitykseltään vähäinen jokiympäristössä, jossa potentiaalisina vaikuttajina pidetään biologisia prosesseja ja bakteeritoimintaa (Droppo & Ongley, 1992 ja 1994, Phillips & Walling, 1995).

Flokit ovat yleensä stabiileja ja niiden rikkoontumista on pidetty vähäisenä tekijänä (Phillips & Walling, 1995). Suspendoituneen sedimentin konsentraation määrä vaikuttaa flokkien muodostumiseen, jolloin partikkelien törmäyksien määrä kasvaa (Droppo & Ongley, 1994).

Hienojakoinen maa-aines on bakteeritoiminnalle soveltuvaa ravinnetta. Makean veden bakteerien halkaisija on suuruudeltaan 0,3–0,7 µm. Bakteerien biomassa sitoutuu suspensioon, jonka määrä kasvaa suspendoituneen sedimentin ja flokkien konsentraation kasvaessa. Polymeerisiä kuituja on tahmean olomuotonsa vuoksi pidetty merkittävänä flokkien muodostajana (Droppo & Ongley, 1994).

Englannin joissa flokkulaatioprosessi vaikutti partikkelikoon vaihtumiseen 30–60 µm:stä 70–120 µm:iin (Phillips & Walling, 1995). Yamaska-joella vallitseva flokkien partikkelikoko oli 20–40 µm. Vastaavasti rannikolla Tamar Estuarylla, Kanadassa, flokkien koko oli suurempi kuin 188 µm (Droppo & Ongley, 1992). Kanadan St Lawrence'n valuma-alueen joissa tehdyssä tutkimuksessa partikkelien määrässä flokkien osuus on vähäinen, mutta kokonaistilavuudessa niiden osuus oli yli 90 %. Virtauksen turbulenssia pidetään flokkien kokoa rajoittavana tekijänä (Droppo & Ongley, 1994).

### 2.3.2 Kymijoen sedimenttien raekoko

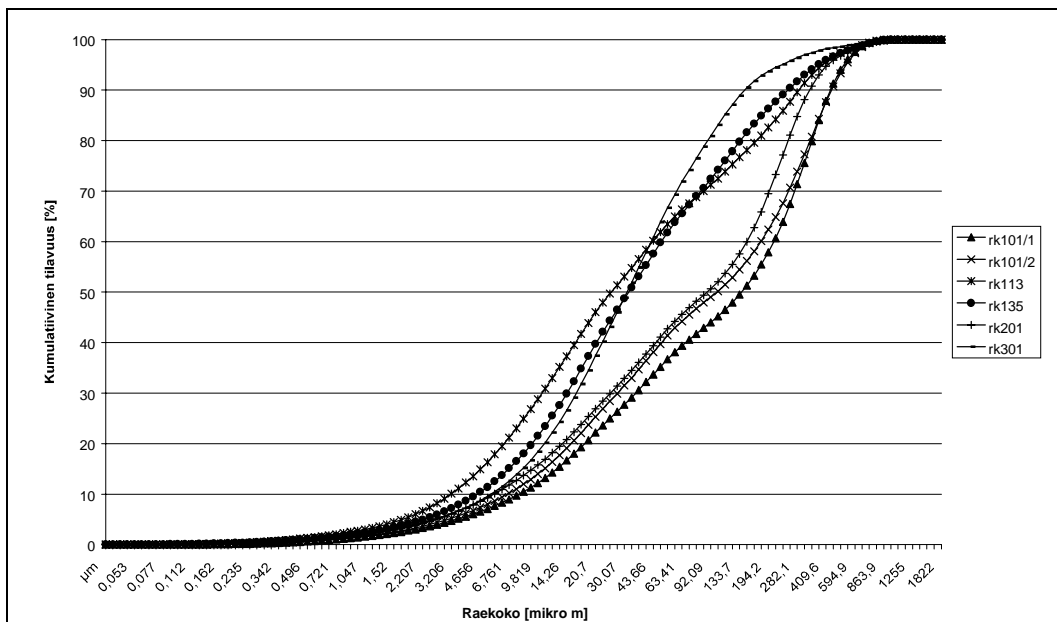
Suomen ympäristökeskus toimitti käyttöön Kymijoen pintasedimentin analyysitulokset. Pintasedimenttianalyysijä (0–5 cm:n syvyydestä) oli käytettävissä Ruotsulasta (Keltti), Myllykoskelta, Heinäsaarelta (Anjalankosken ja Susikosken välillä) sekä Tammijärvestä (Kymijoen läntinen haara).

Ruotsulasta (Keltti) oli käytettävissä kuusi näytettä (Kuva 11a). Näytteiden keskimääräinen raekoko,  $d_{50}$ , vaihteli huomattavasti. Kolmen näytteen  $d_{50}$ -raekoko oli 25–33  $\mu\text{m}$ , kahden näytteen 84–101  $\mu\text{m}$  ja yhden 147–161  $\mu\text{m}$ . Näytteiden maksimikoko oli noin 1 150  $\mu\text{m}$ . Myllykoskelta oli käytettävissä viisi näytettä (Kuva 11b). Näytteiden  $d_{50}$ -raekoko oli 20–70  $\mu\text{m}$ . Näytteiden suurin raekoko oli hieman suurempi kuin Keltin ja Kuusankosken välillä, noin 1 200–1 800  $\mu\text{m}$ .

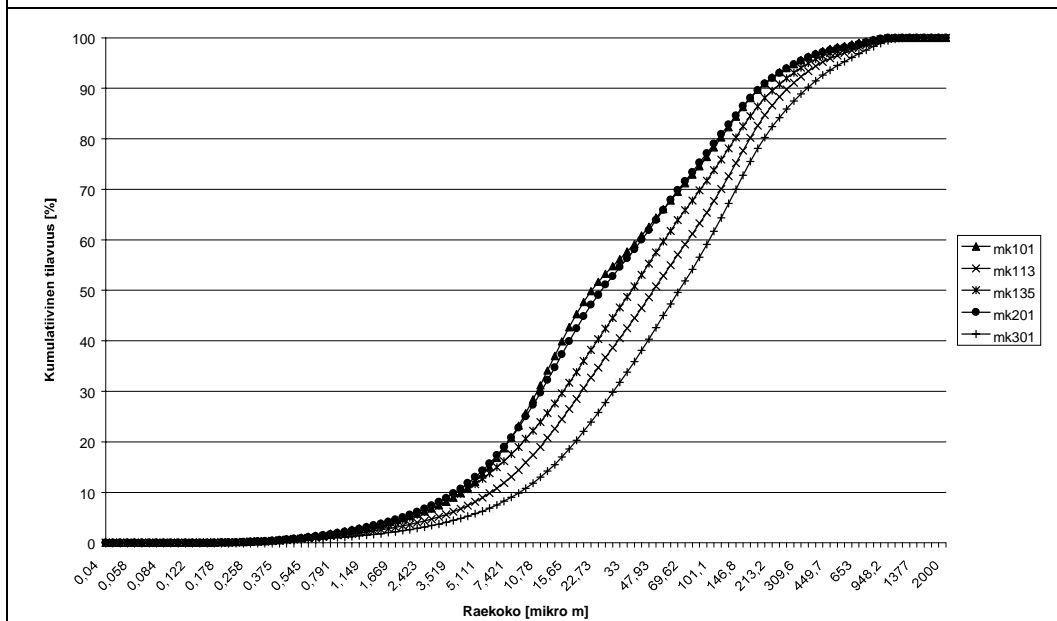
Heinäsaarella (Kuva 13a) kahden näytteen  $d_{50}$ -raekoko oli 30–40  $\mu\text{m}$  sekä kahden muun näytteen 70–75  $\mu\text{m}$  ja 100–110  $\mu\text{m}$ . Näytteiden suurin raekoko oli 1 150–1 250  $\mu\text{m}$ . Kymijoen läntisen haaran Tammijärven (Kuva 13b) viidestä näytteestä kolmen  $d_{50}$ -raekoko oli 20–30  $\mu\text{m}$  ja kahden 45–55  $\mu\text{m}$ . Näytteiden suurin raekoko oli noin 1 050–1 150  $\mu\text{m}$  pienimmillä keskimääräisillä raekoilla ja suuremmilla noin 1 500  $\mu\text{m}$ .

Kymijoen näytteistä valtaosan keskimääräinen raekoko  $d_{50}$  on 20–110  $\mu\text{m}$  (ainoastaan yhden näytteen  $d_{50}$  oli 147–161  $\mu\text{m}$ ).

Vuonna 1996 Kymijoen eri osista otettujen sedimenttinäytteiden perusteella keskimääräinen kosteusprosentti oli noin 74 % ja hehikutushäviö n. 15 % (Kuva 15, Taulukko 1). Suurin kosteusprosentti oli Keltin alapuolelta otetuissa näytteissä (90,7 %) ja pienin Anjalankosken alapuolella Heinäsaaren näytteissä (41,3 %).

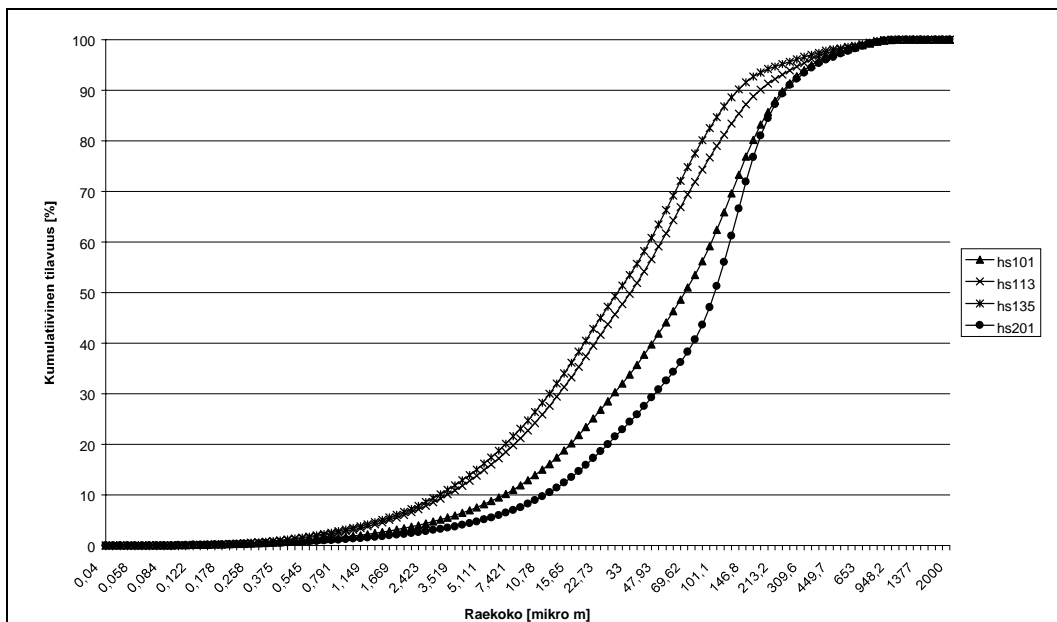


a) Ruotsula, Keltti

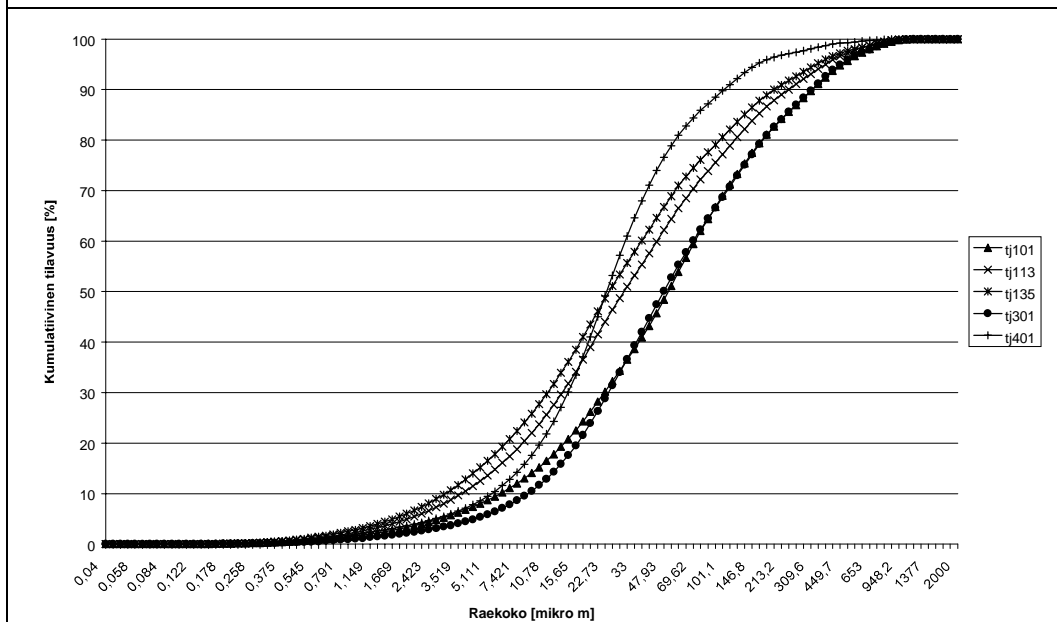


b) Myllykoski

Kuva 11. Kymijoen sedimenttien raekokoanalyysien tulokset a) Ruotsula, Keltti ja b) Myllykoskella (lähde: Suomen ympäristökeskus).

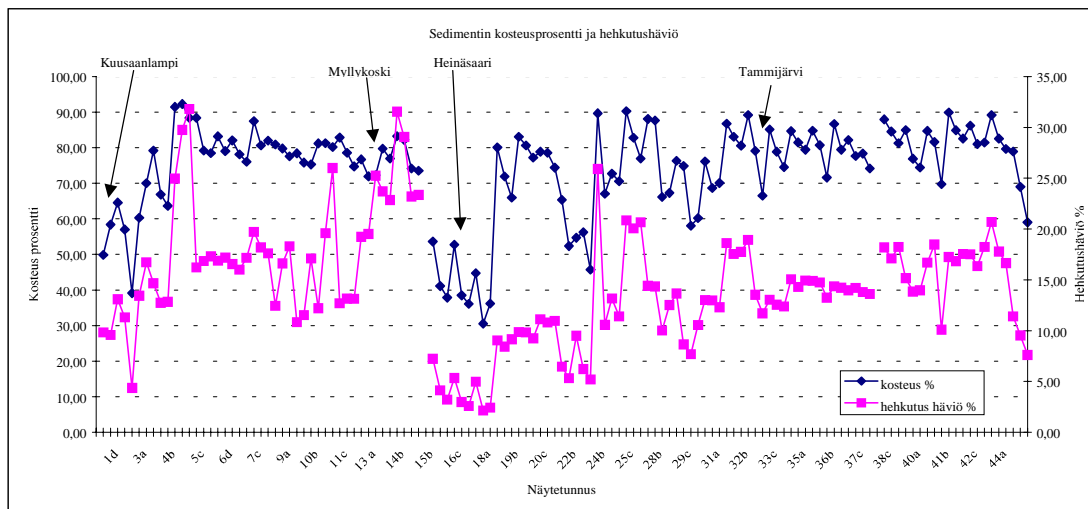


a) Heinäsaari (Susikosken ja Anjalankosken välillä)



b) Tammijärvi, Kymijoen läntinen haara

Kuva 13. Kymijoen sedimenttien raekokoanalyysien tulokset a) Heinäsaaren luona, Anjalankosken alapuolella, ja b) Tammijärvessä, Kymijoen läntisessä haarassa (lähde: Suomen ympäristökeskus).



Kuva 15. Kymijoen sedimentinäytteiden kosteusprosentti ja hehikutushäviö (lähde: Suomen ympäristökeskus).

Taulukko 1. Kymijoen eri osien sedimentinäytteiden keskimääräiset kosteusprosentit ja hehikutushäviöt (lähde: Suomen ympäristökeskus).

	Kosteus %	Hehikutushäviö %	Huom.
2 Ruotsula-Keltti	60,89	11,86	
3 Keltti alapuoli	90,73	28,85	
4 Korja	81,33	17,25	
5 Lopotti	78,88	15,30	Osassa hapeton musta-kerros, osassa kuitua
6 Myllykoski	76,74	24,19	Osassa kuitua
8 Heinäsaari	41,27	3,90	Sedim. 3–5 kerros, alla savikerros
9 Muhjärvi	73,49	9,12	
10 Hirvivuolle	70,67	14,36	Kuitua
11 Vastila	72,32	11,48	
12 Tammijärvi	78,22	14,53	Osassa kuitua
13 Ahvenkoski/	80,09	14,28	
15 Vanhala	81,96	16,12	Kuitua
16 Kymminlinna	78,55	15,09	
	<b>74,24</b>	<b>15,10</b>	

### 2.3.3 Elohopea

Elohopea voi olla pohjasedimentissä erilaisissa olomuodoissa. Elohopea voi olla epäorgaanisessa muodossa, jolloin se on sitoutunut hienojakoisiin partikkeleihin, kuten Minamaton lahdella (Hosokawa, 1993). Epäorgaaninen elohopea ei helposti liukene veteen, ja metyloituminen on erittäin hidasta, jos sedimentti ei ole yhteydessä ilman eikä UV-säteilyn kanssa.

Kokemäenjoen keskiosan tulvasuojeluhankkeeseen kuuluvalla Vesiniityn pengerrysalueella tehtiin elohopeatutkimus ja koekaivu, jonka avulla arvioitiin uoman pohjalla olevien elohopeapitoisten sedimenttien soveltuvuutta penkereen massoiksi. Koeruoppauspaikalla virtausnopeudet olivat alhaisia. Koeruoppauksessa otettiin vesinäytteitä ja sedimentinäytteitä uoman pohjalta ja läjityskasoista. Uoman pohjalta otettujen sedimentinäytteiden keskimääräinen elohopeapitoisuus oli 6,53 mg/kg (0,1–18,7 mg/kg, 18 näytettä) ja läjityskasoista otettujen 2,61 mg/kg (1,7–3,7 mg/kg, 3 näytettä). Vesinäytteiden elohopeapitoisuus oli alle 0,05 µg/l eli pienin käytetyllä analysointiteknikalla havaittava pitoisuus (Lounais-Suomen ympäristökeskus, 2000).

Englannin Yare-joella maksimimetyylielohopean pitoisuudet olivat sijoittuneet juuri veden ja sedimentin rajakerroksen alapuolelle 4–8 cm:n sedimenttikerrokseen. Pitoisuudet olivat vähäisiä noin 30 cm:n syvyydessä. Metyylielohopean konsentraation maksimit muodostuvat kerrokseen, jossa olosuhteet ovat optimaaliset. Veden ja sedimentin rajakerroksen vähäinen metyylielohopean määrä johtuu aerobisten bakteerien aiheuttavasta demetylointiprosessista, kun taas anaerobinen toiminta aiheuttaa metyloitumista. Elohopeasulfidien muodostuminen rajoittaa metyloitumiseen tarvittavien elohopeaionien saatavuutta. Vuodenajat muuttavat metyylielohopean konsentraatioita. Kesällä maksimiarvot sijaitsivat pintakerroksessa, kun taas talvella maksimit sijaitsivat syvemmällä. Metyloitumis- ja demetyloitumisprosesseja säätelevät lämpötila, happipitoisuus sekä bakteeritoiminta. Esim. lämpötilan noustessa 12 °C:sta 22 °C:seen metyylielohopean määrä lisääntyy kymmenessä vuorokaudessa noin 30 % (Bubb et al., 1993).



### 2.3.4 PCDD/F-yhdisteet

Kymijoella PCDD/F-yhdisteiden on oletettu olevan sitoutuneena kiintoaineeseen. Kymijoesta kerättyjen laskeutuvien sedimentinäytteiden perusteella PCDD/F-pitoisuudet noudattivat pintasedimenttien pitoisuustasoja ja alenivat alavirtaan mentäessä. Vuosittaiset kulkeutumaiset Kymijoen eri osissa ovat (Verta et al., 1999):

- Keltti 220 g/a (I-TEQ),
- Anjalankoski 190 g/a (I-TEQ) ja
- Suomenlahti 140 g/a (I-TEQ).

## 2.4 Kymijoen virtaamat ja virtausnopeudet

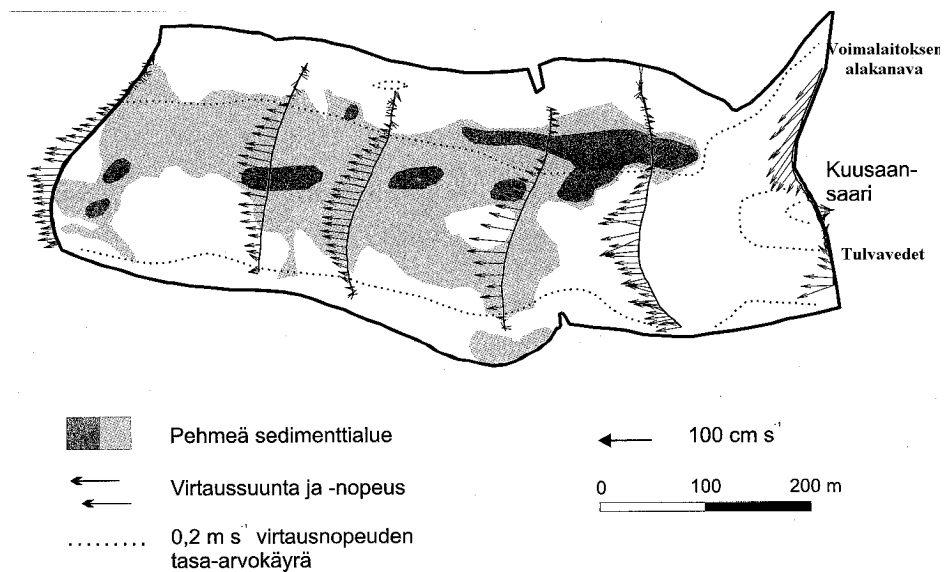
Kymijoen pääuoma on yläosaltaan voimalaitosten porrastama. Kymijoen virtaama määräytyy Pyhäjärven vedenkorkeutta vastaavan purkauskäyrän mukaisesti. Voimalaitoksilla ei harjoiteta lyhytaikaissäännöstelyä. Kuusankosken voimalaitoksella ( $F = 36\,006\text{ km}^2$ ,  $L = 18,9\%$ ) virtaaman vaihtelu on ollut vuosijaksolla 1961–1990 (Hyvärinen, 1998):

- HQ 677 m<sup>3</sup>/s,
- MHQ 441 m<sup>3</sup>/s,
- MQ 307,7 m<sup>3</sup>/s,
- MNQ 196 m<sup>3</sup>/s sekä
- NQ 114 m<sup>3</sup>/s.

Kuusankosken voimalaitoksen (Kuva 9) alapuoliset virtausnopeudet poikkileikkauksissa on mitattu Kymijoen virtaaman ollessa 428 m<sup>3</sup>/s (Kuva 18). Pehmeän sedimentin alueita on Kuusankosken voimalaitoksen alakanavan jälkeen olevalla akanvirta-alueella sekä uoman keskikohdalla. Uoman keskikohdalla pehmeän sedimentin alueilla virtausnopeudet ovat noin 0,35–0,65 cm/s. Kyseisenä ajankohtana ohijuokutus oli poikkeuksellisen suuri (120 m<sup>3</sup>/s). Kuusankosken vesivoimalaitoksen kolmen turpiinin läpi voidaan juoksentaa yhteensä 400 m<sup>3</sup>/s virtaama, joten yksi turpiineista ei ole ollut käytössä. Jos kaikki turpiinit olisivat olleet käytössä, siirtyisi voimakkaamman päävirtauksen alue lähemmäksi uoman vastakkaista rantaa.



Kuva 9. Kuusankosken voimalaitos talvella 1998–1999 ylävirranpuolelta kuvattuna. Voimalaitos ja sen alakanava ovat kuvan oikeassa reunassa.



Kuva 18. Kuusankosken voimalaitoksen alapuolella mitatut virtausnopeudet (30.7.1998, 428 m<sup>3</sup>/s). Tummenetuilla alueilla pehmeän sedimenttikerroksen syvyys on suurempi kuin yksi metri (Verta et al., 1999).

Keskivirtaamaa ( $308 \text{ m}^3/\text{s}$ ) vastaavassa tilanteessa virtaus tulee voimalaitoksen alakanavaa pitkin, jolloin se ohjautuu vastakkaiselle rannalle ja kuvan tulvatilanteessa mitatut uoman keskikohdan alueet ovat todennäköisemmin sedimentaatioalueita (akanvirtaus).

Tulva-aukoista juoksetetaan suurilla tulvilla tulovirtaaman ylittäessä turpiinien rakennusvirtaaman (yli  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ja myös pienemmillä virtaamilla turpiinien ollessa pois käytöstä. Alapuolisen eroosion kannalta pahimmassa tapauksessa tulva-aikana koko tulovirtaama johdetaan säännöstelypadon läpi.

Virtausnopeus pehmeän sedimentin alueilla määräytyy voimalaitoksen alakanaalta ja tulva-aukoilta tulevien virtaamien suhteessa. Tulvajuoksetusten vaikutuksia virtausnopeuksiin ja eroosion suuruuteen voidaan helpoiten arvioida 2-dimensionaalisilla numeerisilla virtausmallilaskelmilla. Tämän lisäksi tarkastelemissa on otettava huomioon valuma-alueen hydrologia ja turpiinin riski olla käytöstä pois.

### **3. Saastuneiden alueiden käsittelymahdollisuudet**

Saastuneiden alueiden käsittelyn suhteen tulevat kysymykseen materiaalin ruoppaaminen ja puhdistaminen, alueen peittäminen tai se, että alueella ei tehdä toimenpiteitä. Tässä luvussa esitetään näkökohtia kunkin toimenpiteen vaikutuksista. Tarkastelu suoritetaan erityisesti Kymijoen saastuneita sedimenttejä silmällä pitäen.

Kymijoen saastuneiden sedimenttien käsittelytapaa valittaessa vaikuttavat olennaisesti seuraavat tekijät:

- Irtoaako haitallisia aineita sisältäviltä alueilta sedimenttiä virtausten ja sen vaihtelun vaikutuksesta?
- Jos sedimentin liikkeelle lähtöä tapahtuu, ovatko pitoisuudet tai odotettavissa olevat kertymät niin suuria, että saastuneet alueet pitää suojata tai ruopata?
- Voidaanko peittäminen tehdä luotettavasti? Kuinka paljon saastunutta sedimenttiä irtoaa peittotyön yhteydessä?
- Kuinka paljon sedimenttiä pääsee karkaamaan ruoppaustyön aikana? Onko määrä pienempi kuin em. luontaisen irtoamisen vaikutuksesta?
- Voidaanko saastuneet sedimentit puhdistaa tai käyttää uudelleen? Siirtykö ongelma toiseen paikkaan?

#### **3.1 Ei toimenpiteitä**

Lähtökohta tämän toimenpiteen toteuttamiselle tai pikemminkin toteuttamatta jättämiselle perustuu olettamuksiin, että alue joko peittyy ja suojautuu kulkevan sedimentin vaikutuksesta tai haitallisia aineita sisältävät sedimentit eivät pääse lähtemään liikkeelle. Lisäksi tämä vaihtoehto tulee kysymykseen, jos haitallisen aineen laimeneminen on nopeaa.

Pohjasedimentin liikkeelle lähtöön vaikuttaa virtausnopeudesta aiheutuva leikkausjännitys, jonka vaihtelu johtuu virtaaman muutoksesta, jääkannen vaikutuksesta sekä mahdollisesti jää- ja suvannejääpatojen syntymisestä.

Kymijoella jääpatoja muodostuu uoman alaosalla (Anjalankosken alapuolella) vapaana virtaavien koskien alueella. Jääpadot saattavat aiheuttaa uoman syöpmistä sellaisista kohdista, mistä ne eivät aikaisemmin ole syöpyneet. Billfalkin (1992) mukaan Ruotsissa Älvkarlebyn voimalaitoksen alapuolella pohjajäätä muodostui uoman matalaan ja kivikkoiseen keskiosaan. Valtavan jäänmuodostumisen johdosta virtaus kääntyi uoman reunoille, mikä olisi aiheuttanut vakavia eroosio-ongelmia. 1980-luvun alussa jääpatoja räjäytettiin. Uoman keskiosan perkausten ja luiskasuojauksien jälkeen ongelmat ovat poistuneet.

Jääpadon aiheuttama eroosio syventää uomaa. Uoman syventyessä sula ajan virtausnopeudet pienenevät, jolloin tähän syventyneeseen kohtaan virtauksen mukana kulkeutuvat haitalliset aineet voivat helpommin sedimentoitua. Talviaikana jääpadon eroosiovaikutuksesta sedimentoitunut materiaali lähtee liikkeelle, jolloin haitallisten aineiden määrä on suurempi kuin normaalisti. Esitettyä ongelmaa ei pääse muodostumaan, jos haitallisia aineita sisältävien sedimenttien liikkeellelähtö on estetty (uomassa kulkeutuva materiaali ei sisällä haitallisia aineita).

Kymijoen tulvavirtaamat (MHQ) ovat noin puolitoista kertaa suurempia kuin joen keskivirtaama. Virtaaman lisäyksen seurauksena myös uoman virtausnopeudet kasvavat. Tulvia juoksutetaan myös säännöstelypadon kautta, mikä vaikuttaa virtausnopeusjakautumaan voimalaitospadon alapuolella. Voimalaitoksen koneistojen revisiot ja käyttöhäiriöiden aiheuttamat seisokit lisäävät ohijuoksutuksia. Suurilla virtaamilla ja tulva-aukkojen juoksutuksilla muutetaan alapuolista virtausnopeuskenttää, ja sedimentaatioalueet voivat muuttua eroosio-alueiksi.

Kuusankosken ja Keltin välisellä jokiosuudella sijaitsevat pahiten saastuneet alueet. Haitallisten aineiden pitoisuuksia on tavattu myös Kymijoen alaosalla. Kuusankosken alapuolella saastuneiden sedimenttien liikkeelle lähtöön vaikuttavat olennaisesti tulva-aukkojen kautta tapahtuvat juoksutukset. Eroosion laajuuden ja vaikutusten selvittäminen edellyttää hydrologisia ja numeerisia virtaus- ja kulkeutumislaskelmia, joissa otetaan huomioon turpiinien käyttöhäiriöt.

## 3.2 Peittäminen

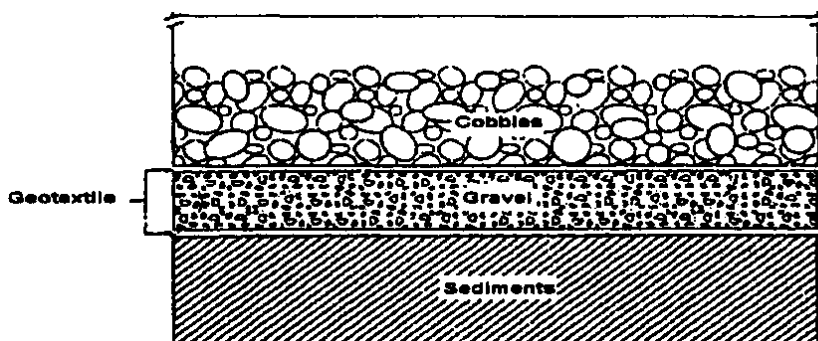
Saastuneet alueet voidaan peittää puhtaammilla sedimenteillä, kuten hiekalla ja soralla, tai rakenne voi sisältää useampia kerroksia erotettuna geotekstiileillä (Kuva 11). Peittämisen tarkoituksena on (Palermo, 1998)

- eristää saastuneet sedimentit muusta ympäristöstä
- stabiloida saastuneet sedimentit, estää haitallisten aineiden liikkeellelähtö ja niiden kulkeutuminen muille alueille sekä
- pienentää haitallisten aineiden siirtymistä sedimentistä ympäröivään veteen.

Peittämisen edellytykset ovat olemassa, jos (USEPA, 1993)

- alueella tapahtuu sedimentin irtoamista niin paljon, ettei aluetta voida jättää toimenpiteittä
- sedimenttien ruoppauksen ja käsittelyn kustannukset ja ympäristövaikutukset ovat liian suuret
- peittämiseen soveliaista materiaalia on saatavilla
- alueen virtausolosuhteet eivät tule muuttumaan olennaisesti ja
- peittämiselle on olemassa tukeva pohja.

Myös peittämistyön vaikutus sedimentin suspensioon ja leviämiseen on arvioitava päätöstä tehtäessä.



Kuva 11. Esimerkki peittämisrakenteesta (Palermo, 1998).

### 3.3 Ruoppaus

Vaihtoehtoisia ratkaisuja peittämiseksi ovat saastuneiden alueiden ruoppaus ja siirtäminen toiselle vesi- tai maa-alueelle tai maa-ainesten käsitteleminen. Massojen siirtäminen toiselle alueelle tulee kysymykseen esim. vesiväylän syventämisen yhteydessä. Ruoppausmenetelmän valintaan vaikuttavat ruopattavan materiaalin ominaisuudet ja olosuhteet. Lisäksi ruoppaustyön aikana on pyrittävä minimoimaan ruoppaustyön (ruoppauksen, siirron, läjityksen, käsittelyn tai peiton) aikana veteen tai maaperään suspensoituneen haitallisia aineita sisältävien sedimenttien määrä.

Työssä valitaan ruoppausmenetelmä, joka aiheuttaa vähiten sedimentin suspensiota. Ruoppaajilla työskentelevien täytyy olla ammattitaitoisia sekä tietoisia ruoppaustyön ympäristövaikutuksista. Lisäksi sedimentin kulkeutumista ja leviämistä voidaan rajoittaa silttiverhojen käytöllä tai ruoppaustyö voidaan suorittaa työpatojen suojissa. Maarakenteisen työpadon rakentaminen vaatii tilaa, ja sen rakentaminen ja purkaminen aiheuttavat lisäkustannuksia, joten useinkaan työpadon rakentaminen ei ole mahdollista.

Joen virtaukset hankaloittavat saastuneiden sedimenttien ruoppaustyötä. Virtaus lisää maa-aineksen irtoamista, ja suspendoitunut aine kulkeutuu virtauksen mukana pitkiä matkoja. Suspension sisältävä haitallinen aine saattaa aiheuttaa haitallisia vaikutuksia joen alajuoksulla.

## 4. Saastuneiden sedimenttien ruoppaus- ja käsittelymahdollisuudet

### 4.1 Ruoppaustyön toteutus

Ruoppaustyö on toteutettava siten, että pohjalla oleva sedimentti ei pääse sekoittumaan (suspensoidu) vesimassaan. Tämän vuoksi saastuneiden sedimenttien ruoppausmenetelmä on valittava siten, että tämä vesimassaan sekoittuva sedimentti ja siten myös haitallisten aineiden määrä voidaan minimoida.

Saastuneiden sedimenttien ruoppaustyön ja käsittelymenetelmien valintaan vaikuttavat seuraavat tekijät (USEPA, 1993):

- **Ruoppauskohteen olosuhteet.** Kulkuyhteydet, vesisyvyys, virtausten suunta ja voimakkuus, aallonkorkeus.
- **Sedimentin ominaisuudet ja käyttäytyminen.** Sedimenttipartikkelien laskeutumis-, suspensoitumis- sekä haitallisten aineiden adsorboitumis- ja absorboitumisominaisuudet ja muut fysikaaliset ominaisuudet, kuten esim. koko ja orgaanisen aineksen pitoisuus. Nämä tekijät määrittelevät partikkelin käyttäytymisen ruoppaustyön ja käsittelyn aikana.
- **Haitallisten aineiden ominaisuudet ja niiden käyttäytyminen sedimentissä.**
- **Lainsäädännölliset tekijät,** jotka vaikuttavat parannustoimenpiteen valintaan.

### 4.2 Ruoppausmenetelmät

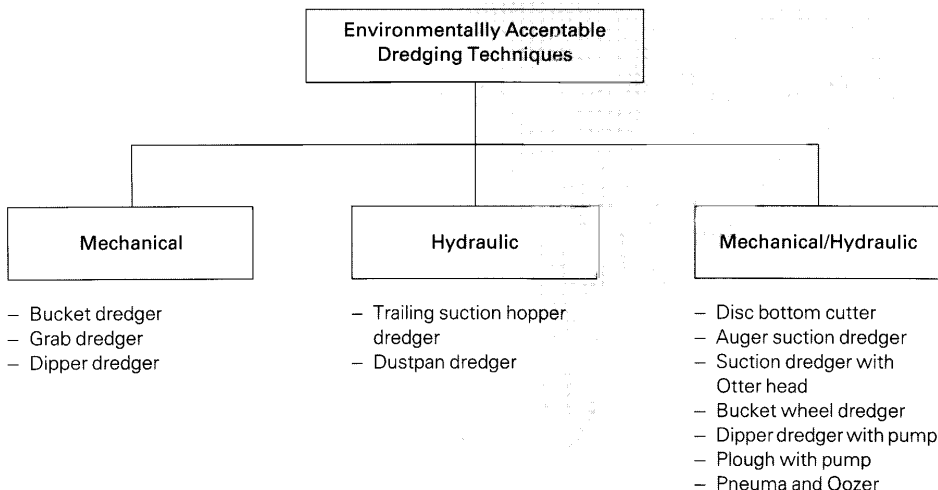
Saastuneiden sedimenttien ruoppaustyö voidaan tehdä mekaanisesti kaivamalla, hydraulisesti käyttäen hyväksi vedenvirtausta tai pneumaattisesti. **Kauharuoppaajilla** (mechanical dredger) maa-aines irroitetaan käyttäen mekaanista voimaa ja materiaali siirretään kauhalla pois. **Imuruoppaajilla** (hydraulic dredger) ruopattu sedimentti siirretään nestemäisenä lietteenä keskipakopumppujen avulla. **Pneumaattiset ruoppaajat** käyttävät puristettua ilmaa ja/tai hydrostaattista painetta sedimenttien poistamiseen. Näiden ruoppaajien lietteen kiintoainepitoisuus on suurempi kuin imuruoppaajien (USEPA, 1991).



Rokoschin (1993) mukaan saastuneiden sedimenttien ympäristöystävällisen ruoppauksen kriteerejä ovat mm.:

- *Turvallisuus* edellyttää, etteivät esim. kunnostustyötä tekevät joudu ihokosketukseen ruoppausmassojen kanssa.
- *Ruoppausmateriaalin vuodot ja päästöt* ympäristöön on rajoitettu.
- *Veden samentuminen* on rajoitettu minimiin.
- *Ruoppauksen tarkkuus ja selektiivisyys*. Selektiivisyydellä tarkoitetaan ruoppauskohteen erilaisia olosuhteita (tiheyttä, kerrospaksuutta, haitallisten aineiden pitoisuuksien vaihteluja jne), joihin ruoppaajan työskentelyn on mahdollista sopeutua.
- *Ruoppausmassan kiintoainepitoisuus*.
- *Muita tekijöitä* ovat mm. ruoppauskohde (satama, jokialue, syvyys, jne), sedimentin ominaisuudet, ruopattavan kerroksen paksuus ja luotettavuus.

Rokosch (1993) on edellä mainittujen kriteerien perusteella karkeasti määrittänyt ympäristöystävälliset ruoppausmenetelmät (Kuva 13).



Kuva 13. Ympäristöystävällisiä ruoppausmenetelmiä Rokoschin (1993) mukaan.

#### 4.2.1 Kauharuoppaajat (mechanical dredgers)

Kauharuoppaajat soveltuvat soran, hiekan ja koheesiomaalajien, kuten saven ja siltin, ruoppaamiseen. Kauharuoppaajien ruoppausmassojen kiintoainepitoisuus vastaa likimain luonnontilaista. Kauharuoppaajien kaivumassat nostetaan koko vesipatsaan läpi, jolloin avoimien kauhojen massat ovat yhteydessä veden kanssa (Rokosch, 1993).

##### **Kuokkakauha, pistokauha, pumppukauha (backhoe, dipper dredger, dipper dredger with pump)**

Näiden kauharuoppaajien toimintatapa on samanlainen kuin kahmarikauhalla operoitaessa. Kaivulaitteena käytetään ruopatessa joko ruoppaajaa kohti liikkuvaa kuokkakauhaa (backhoe) tai ruoppaajasta pois päin liikkuvaa pistokauhaa (dipper). Pumppukauha (dipper dredger with pump) eroaa normaalista kauharuoppaajasta ruoppausmassojen siirron osalta. Kauhaan sijoitettu pumppu kuljettää massan putkea pitkin ylös. Kauhaa ei tarvitse nostaa ylös massoja siirrettäessä. Kiintoainetta pääsee karkaamaan ainoastaan irrotustyön aikanan (Rokosch, 1993).

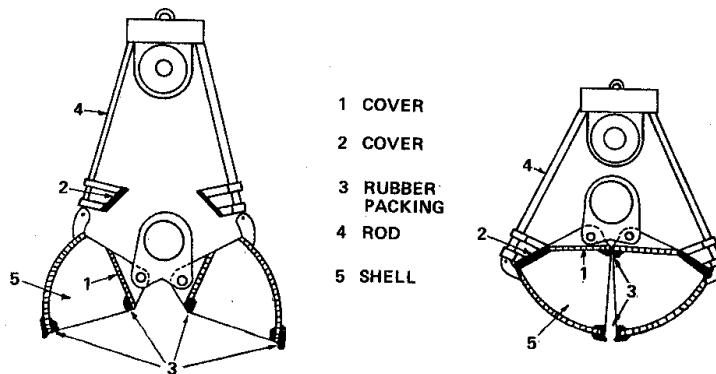
Pennekamp et al. (1996) ovat mitanneet hydrauliseen kaivuriin sijoitetun avoimen ja suljetun kuokkakauhan aiheuttamaa samentumista Wijk bij Duurstedessä, Amsterdam–Rein-kanaalin ruoppaustöiden yhteydessä (Taulukko 3). Avoimella kauhalla samentuminen kasvoi noin 3-kertaiseksi suljettuun verrattuna ja suspension määrä oli noin 2,5-kertainen.

*Taulukko 3. Hydrauliseen kaivuriin sijoitetun avoimen ja suljetun kuokkakauhan aiheuttama samentuminen Amsterdam–Rein-kanaalissa, Wijk bij Duurstede (Pennekamp et al., 1996).*

	Teho [m <sup>3</sup> /h]	Taustan samentuminen [mg/l]	Samentumisen lisäys (50 x 50 m <sup>2</sup> :n alueella) [mg/l]	Suspension määrä [kg/m <sup>3</sup> ]
Avoin kuokkakauha	208	40	530	54
Suljettu kuokkakauha	199	45	170	21

## Kahmarikauha (bucket, clamshell) ja kourakauha (grab)

Avoimen kahmarikauhan dynaamisesta vaikutuksesta pohjaan, ylitäytöstä johtuvasta ja täyden kauhan vuodosta sekä laskeutuvan kauhan huuhteluvaikutuksesta johtuen suspensiomäärä on suurempi kuin leikkuri-imuruoppaajalla. Suspension määrää voidaan pienentää käyttämällä suljettua kahmarikauhaa, jonka läpi vesi pääsee virtaamaan kauhaa laskettaessa. Suljetun kauhan (Kuva 15) vuodot pienenevät likimain 35 % avoimeen kauhaan verrattuna ja samentuminen pienenee noin 30–70 %. Suspensiota voidaan edelleen pienentää hidastamalla kahmarin laskua ja nostoa (Kuva 17) (USACE, 1983, Hayes, 1986).

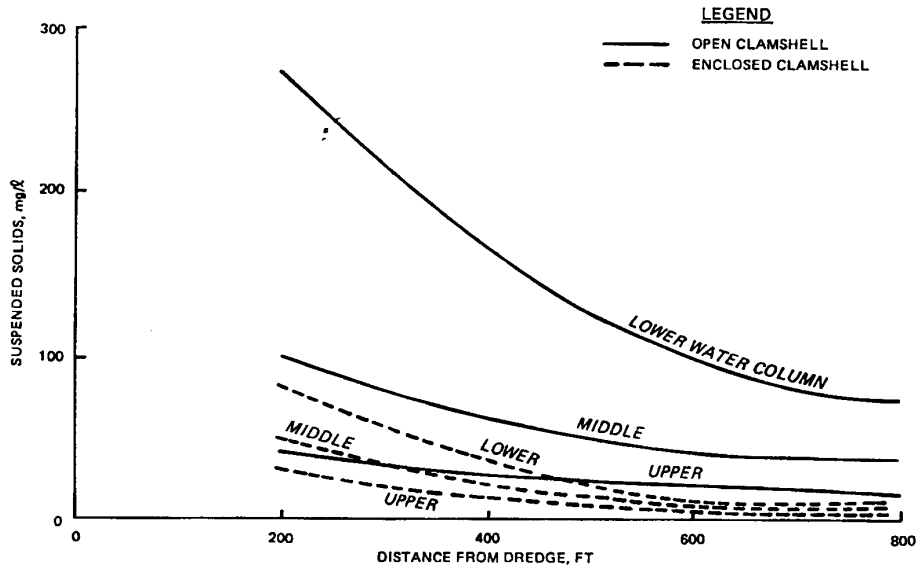


Kuva 15. Vesitiivis suljettu kahmarikauha avattuna ja suljettuna (Herbich, 1992).

Kahmarikauhalla saadaan kaivettua tasainen pohja, kun taas kourakauhalla pohjasta tulee epätasainen (Rokosch, 1993).

## Muut mekaaniset ruoppaajat

Saastuneiden sedimenttien ruoppamiseen ei suositella ketjukauha- (bucket ladder dredges) eikä laahakauharuoppaajaa (dragline dredges), koska nämä menetelmät aiheuttavat maa-aineksen liiallista sekoittumista veteen (USACE, 1983, USEPA, 1991).



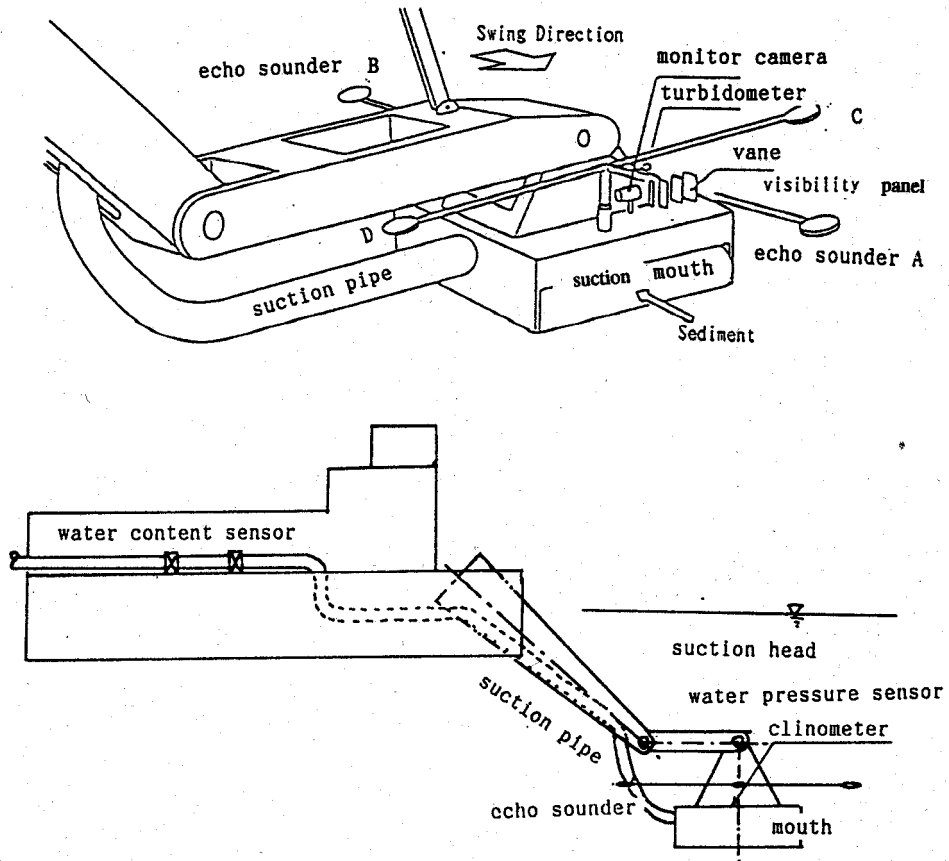
Kuva 17. Avoimen ja suljetun kahmarikauhan suspensio ruoppaustöiden yhteydessä (St. John, USA). Maa-aines siltti, virtausnopeus  $<0,1$  m/s, avoin kauha  $9,2$  m<sup>3</sup> ja suljettu kauha  $11,5$  m<sup>3</sup> (Hayes, 1986, Collins, 1995).

#### 4.2.2 Imuruoppajat (hydraulic dredgers)

Imuruoppajat soveltuvat hiekan ja heikosti konsolidoituneen koheesiomaalajien, kuten siltin, ruoppaukseen. Koheesivoimien rikkomiseen voidaan käyttää leikkuria. Ruoppausmassojen kiintoainepitoisuus on luonnontilaista pienempi, koska massoihin lisätään vettä kuljettamisen helpottamiseksi. Ruoppaustyö suoritetaan suljetussa systeemissä, mutta imupään tukkeutuessa laite joudutaan nostamaan pintaan (Rokosch, 1993)

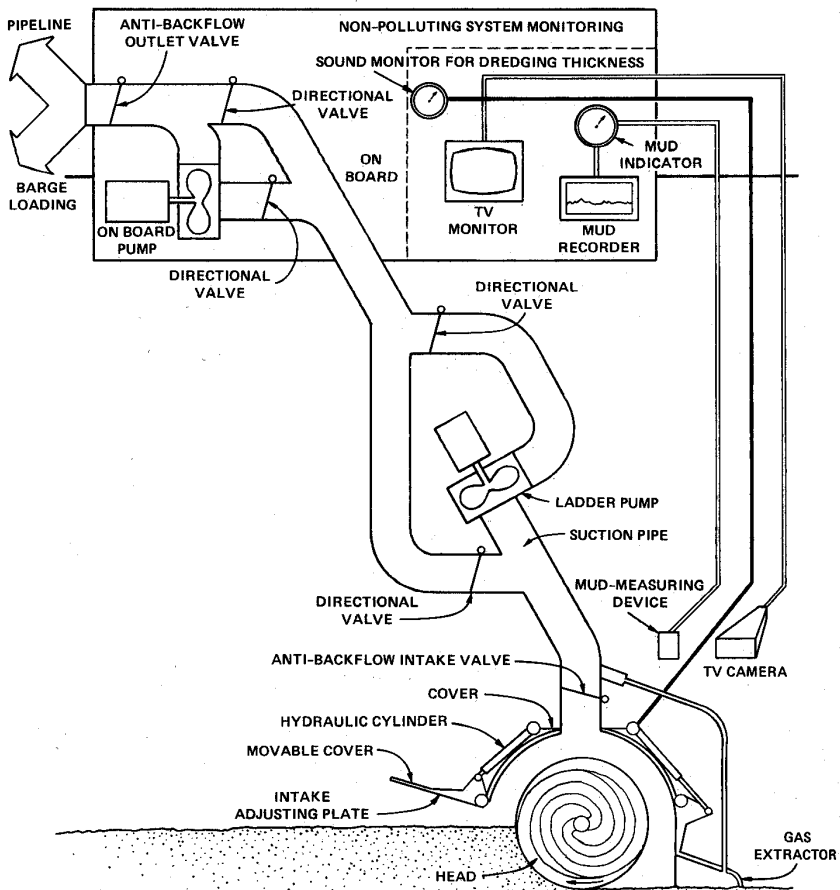
'Clean-up' on japanilaisten kehittämä kairalla varustettu imuruoppaja. Kaira on sijoitettu koteloon ruoppaushaittojen vähentämiseksi (Riipi, 1997). Hayesin (1986) mukaan järjestelmän aiheuttaman suspension imupään yläpuolella on ilmoitettu olevan  $1,1-7,0$  mg/l ja pinnassa  $1,7-3,5$  mg/l.

Minamatan lahdella Japanissa elohopeaa sisältävien sedimenttien ruoppaamiseen käytettiin imuruoppaajaa, joka ei sisältänyt kairaa tai leikkuria (Kuva 19). Imupäähän oli asennettu mm. kaikuluotaimia pohjan muotojen määrittämiseen sekä sameuden mittauslaitteisto (Hosokawa, 1993).



Kuva 19. Minamatan lahdella käytetty imuruoppaaja (Hosokawa, 1993).

**Refresher-ruoppaaja** (Kuva 21) kehitettiin Japanissa saastuneiden sedimenttien ruoppamiseen. Leikkuri on peitetty joustavalla kotelolla, joka estää sedimenttien karkaamisen. Pilotiruoppaajan käyttö rajoittuu syvyysalueelle 18,2–35,0 metriä (Herbich, 1992).

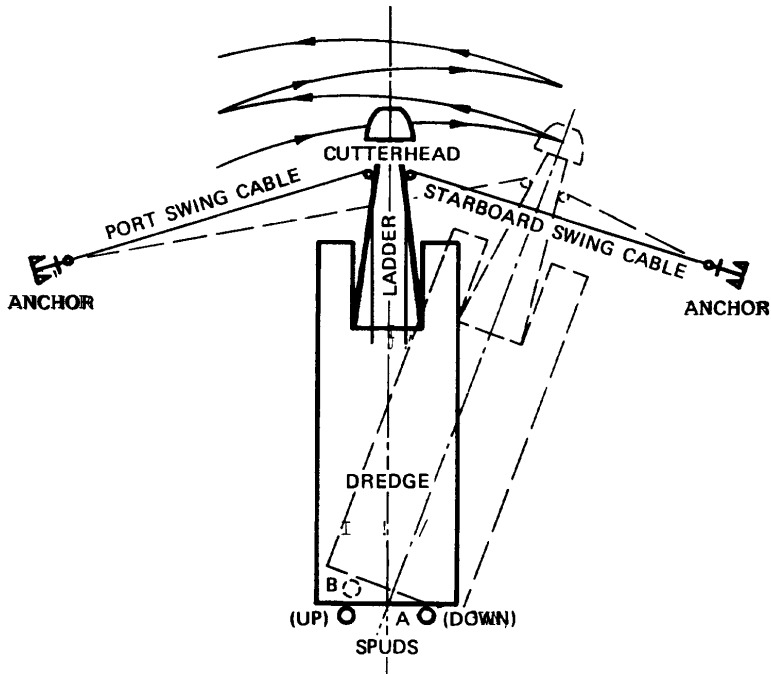


*Kuva 21. Japanilainen Refresher-ruoppaaja (Herbich, 1992).*

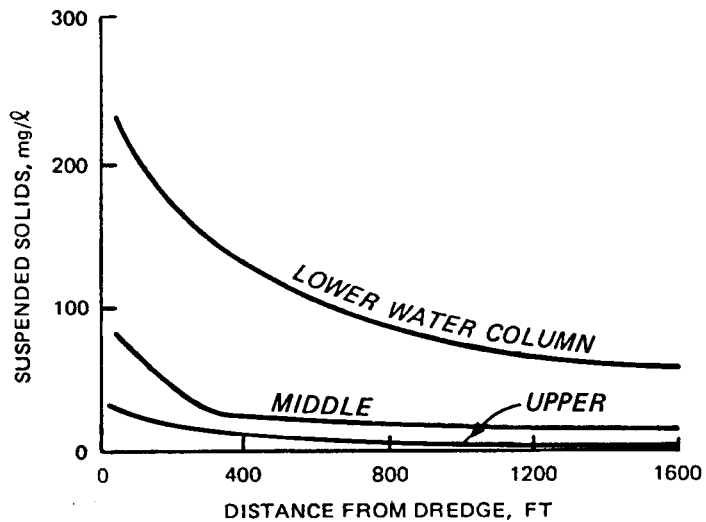
**Levyleikkuriruoppaajan** (disc bottom cutter) (Kuva 23) leikkurilla sedimentti irroitetaan pyörittämällä pystyasennossa olevia levyjä ja ruopattu materiaali imetään leikkaavien terien läheisyyteen sijoitetulla pumpulla. Terät liikkuvat suhteellisen hitaasti, ja laitetta käytetään keskimääräisesti konsolidoituneiden sedimenttien (siltin ja hiekan) ruoppaamiseen. Ruopatun massan kiintoainespiitoisuus on 0,7 : 1, joka on huomattavasti suurempi kuin tavallisilla imuruoppaajilla (noin 1 : 4–5). Tarvittava vesisyvyys on noin 1–2 metriä, ja ruopattavan kerroksen paksuus on noin 40–50 cm (laitteella on päästy liejussa 20 cm:n ja hiekassa 15 cm:n leikkauskerrokseen). Suspension karkaamista ja sameutta tapahtuu sedimentin koheesiovoimia rikottaessa (Rokosch, 1993, Riipi, 1997).



*Kuva 23. Levyleikkuriruoppaaja (disc bottom cutter) (Rokosch, 1993).*



Kuva 25. Leikkuri-imuruoppaajan toimintatapa (USACE, 1983).

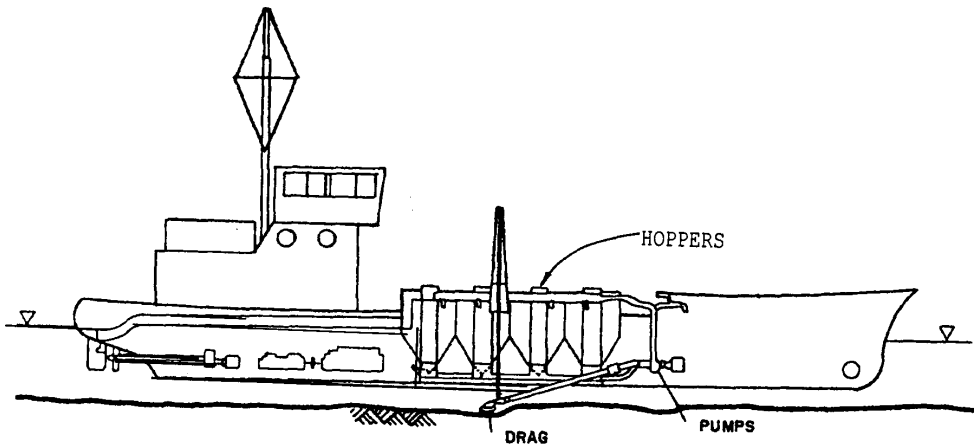


Kuva 26. Leikkuri-imuruoppaajan suspendoituneen sedimentin määrät Savannah-joella Yhdysvalloissa tehtyjen mittauksien perusteella. Maa-aines on pehmeä orgaaninen savi tai siltti, virtausnopeus  $< 0,8$  m/s (Hayes, 1986, Collins, 1995).

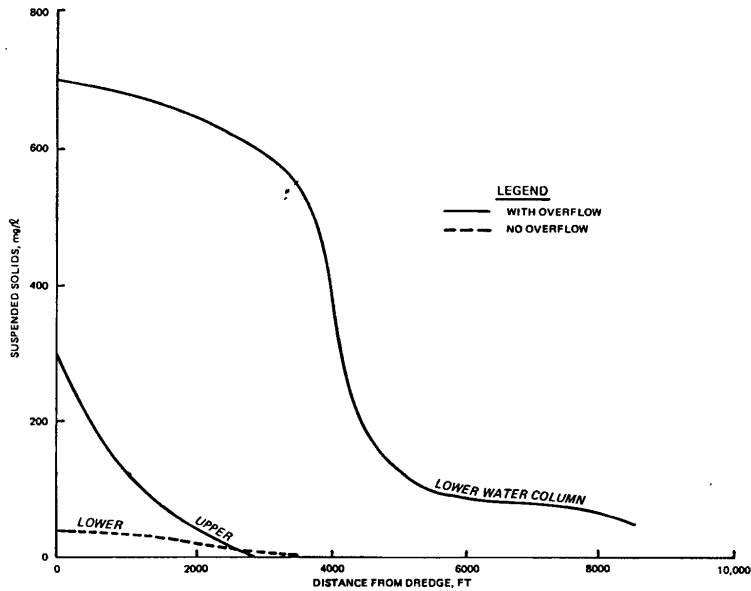


**Leikkuri-imuruoppaaja** (cutterhead dredger) pystyy pumppaamaan ruoppausmateriaaleja pitkiä matkoja. Pumpattu liete sisältää noin 10–20 % kiintoainesta (kuivapainosta) ruopattavasta materiaalista, ruoppausvyvyydestä, pumppujen tehosta ja pumppausmatkasta riippuen. Sedimentin suspensiota voidaan pienentää säätämällä leikkurin pyörimisnopeutta, puomin heilahdusnopeutta sekä leikkauksen syvyyttä (Kuva 25). Yleensä nämä säätötoimenpiteet eivät vaikuta laitteen tehokkuuteen. Liian suuressa leikkauksessa imukyky ylitetään, mikä aiheuttaa ylimääräisen suspension vapautumista. Savannah-joella, Yhdysvalloissa tehdyissä mittauksissa vapautuneen sedimentin määrä oli pohjakerroksissa yli 200 mg/l (Kuva 26) (USACE, 1983, Hayes, 1986).

**Hoppereiden** suuret litteät laahapääät irrottavat sedimentin, joka poistetaan imua hyväksi käyttäen (Kuva 27). Hoppereiden ylijuuksutuksen käyttöä ei suositella käytettäväksi saastuneiden sedimenttien käsittelyyn, koska ylijuuksutuksen mukana suspendoitunut sedimentti pääsee takaisin vesistöön. Tanskalaisen tutkimuksen mukaan (Herrmann et al., 1999) hopperin ylijuuksutusvesi saattaa sisältää kiintoainetta, joka on noin 2–10 % ruopattun materiaalin määrästä. Laahapään takana suspension mittausta on vaikeaa, mutta ilman ylijuuksutusta suspension määrä oli jopa pienempi kuin leikkuri-imuruoppaajalla (Kuva 29) (USACE, 1983, Hayes, 1986).



*Kuva 27. Itsekulkeva, merikelpoinen hopperi (USACE, 1983).*



Kuva 29. Hopperin takana mitattu suspension määrä Grayn sataman (Yhdysvalloissa) ruoppausten yhteydessä. Maa-aines on hiekkainen siltti, virtausnopeus  $<0,8$  m/s (Hayes, 1986, Collins, 1995).

Hayesin (1986) selvityksessä on verrattu leikkuri-imuruoppaajan, hopperin ja kahmarikauhan aiheuttamia suspensiopitoisuuksia (Taulukko 5). Suspensiopitoisuudet olivat samansuuruisia leikkuri-imuruoppaajalla, hopperilla (ilman ylivirtausta) ja suljetulla kahmarikauhalla (max noin 200–300 mg/l).

**Dust pan -imuruoppaajassa** on leveä litteä imupää, johon on asennettu vesisuihkuja hiekan tai konsolidoituneen siltin irrottamiseksi. Laite soveltuu ohuiden sedimenttikerrosten ruoppaamiseen (muutamia senttimetrejä paksujen). Laite tarvitsee vesisyvyyyttä noin 1–2 metriä. Imupää tukkeutuu helposti. Laitteella voidaan ruopata tarkasti pysty- ja vaakasuunnassa. Vesisuihkuja käytettäessä aiheutuu sameutta ja suspension karkaamista, jolloin imupään järjestelyt on suunniteltava huolellisesti ylimääräisen sameuden estämiseksi (Rokosch, 1993).

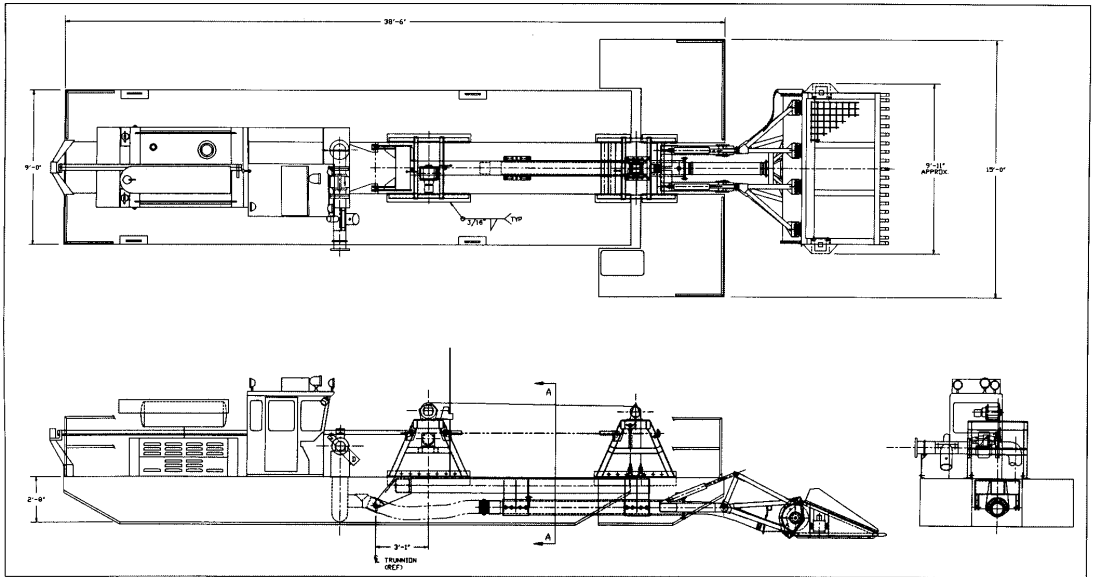
Taulukko 5. Leikkuri-imuruoppaajan, hopperin ja kahmarikauhan aiheuttamia suspension konsentraatioita (Hayes, 1986).

Ruoppaaja	Suspension konsentraatio 30 metrin päässä (mg/l)	Suspension konsentraatio 60 metrin päässä (mg/l)	Suspension konsentraatio 120 metrin päässä (mg/l)
Leikkuri-imuruoppaaja	25–250	20–200	10–150
Hopperi			
– ylivirtaus	250–700	250–700	250–700
– ei ylivirtausta	25–200	25–200	25–200
Kahmarikauha			
– avoin kauha	150–900	100–600	75–350
– suljettu kauha	50–300	40–210	25–100

**Mud Cat -ruoppaaja.** Matalan veden olosuhteisiin muutettua ruoppaajaa on käytetty Welland-joen (Kanadassa) saastuneiden sedimenttinen ruoppauksissa. Ruoppaaja käsitti kaksi sisäänpäin kääntyvää kairaa, jotka pakottavat ruoppausmassat takana olevan imun vaikutuspiiriin. Kairojen suojalevyjä suurentamalla voitiin pienentää ruoppaajan aiheuttamaa sameutumista (Kuva 31). Joella mitattiin sameus ja kiintoainepitoisuus (Taulukko 7). Välittömästi ruoppaajan takana sameus ja kiintoainepitoisuus kasvoivat huomattavasti mutta laimenivat nopeasti joen virtaukseen sekoittuneena (Buchberger, 1993).

Taulukko 7. Mud Cat -ruoppaajan aiheuttama samentuma ja kiintoainepitoisuus Welland-joella, Kanadassa (Buchberger, 1993).

Mittaus	10 metriä ylävirtaan	Ruoppaajan takana	10 metriä alavirtaan
Sameus, keskim. [NTU]	5,4	14,8	4,8
Sameus, maksimi [NTU]	19	70	21
Kiintoainepitoisuus, keskim. [mg/l]	7,5	50,9	6,0
Kiintoainepitoisuus, maksimi [mg/l]	21	356	18



Kuva 31. Welland-joen saastuneiden sedimenttien ruoppauksessa käytetty Mud Cat MC 915 ENV -ruoppaaja (Buchberger, 1993).

### 4.2.3 Pneumaattiset ruoppaajat

Pneumaattiset ruoppaajat on asennettu yleensä proomuihin (joiden pituus on noin 30 m ja syväys 1–2,5 m). Ruopatun lietteen kiintoainespitoisuus on suurempi kuin hydraulisilla ruoppaajilla. Niiden aiheuttama pohjamateriaalin suspension määrä on vähäinen. Yleisimpiä pneumaattisia ruoppaajia ovat airlift-ruoppaajat, Italiassa kehitetty Pneuma sekä Japanissa kehitetty Oozer (Taulukko 5). Airlift ja Pneuma eivät sovellu konsolidoituneen sedimentin ruoppamiseen. Toimiakseen kunnolla pneumaattiset ruoppaajat vaativat vähintään noin 3 metriä vettä (7,5 jalkaa) (USEPA, 1991 ja 1993, Riipi, 1997).

Japanilaiset ovat käyttäneet pneumaattisissa ruoppaajissa hyväksi alipainetta (tyhjiä), jotta ruoppaus onnistuu matalissa vesisyvyyksissä. Systemin etuina ovat jatkuva yhtenäinen virtaus sekä korkea kiintoainespitoisuus (60–80 %) (Herbich, 1992).

Taulukko 9. Pneumaattisten ruoppaajien ominaisuuksia (USEPA, 1991).

Menetelmä	Soveltuvuus	Teho [m <sup>3</sup> /h]	Suhteelliset kustannukset
Airlift	Löyhien ja juoksevien sedimenttien ruoppaus syvältä	45–300	Keskimääräinen
Pneuma	Konsolidoitumattomien ja juoksevien sedimenttien ruoppaus	45–300	Korkea
Oozer	Pehmeiden ja juoksevien sedimenttien ruoppaus jokiuomista tai satamaltaista suhteellisen matalista vesistä	380–600	Korkea

Pneuman työskennellessä on suspension konsentraatioksi ilmoitettu 48 mg/l noin metrin korkeudella ja 4 mg/l noin 7 metrin korkeudella pohjasta. Oozerin aiheuttama suspensio oli taustasuspension suuruinen (6 mg/l) (Hayes, 1986).

### 4.3 Ruoppausmassojen siirto

Saastuneiden ruoppausmassojen siirrossa on oltava erittäin huolellinen, jotta haitallisia aineita ei pääse erilaisten vuotojen takia takaisin veteen tai puhtaalle maa-alueelle. Ruoppausmassojen siirtoon käytetään putkilinjoja ja proomuja. Putkilinjoja käytetään suhteellisen lyhyisiin siirtomatkoihin.

Käytettäessä proomuja saastuneiden sedimenttien kuljettamiseen on kiinnitettävä huomiota mm. välineiden puhdistukseen ja puhdistusvesien käsittelyyn, haihtuvien yhdisteiden päästöjen kontrolliin sekä proomun lastauksen ja puron aikaisiin toimenpiteisiin sekä tehtävä väylällä tarvittavat varotoimet onnettomuuksien välttämiseksi (USEPA, 1993).

### 4.4 Ruoppausmassojen läjitys

Ennen saastuneiden massojen puhdistusta on ruopattu aines syytä käsitellä, jotta käsiteltävien massojen määrät eivät kasva liian suuriksi. Toimenpiteinä tulevat kysymykseen vedenpoisto ja sedimentin lajittelu eri kokoluokkiin.

#### 4.4.1 Vedenpoisto

Läjitettävät massat sisältävät runsaasti vettä ruoppaustavasta riippuen. Vedenpoisto ruopattusta materiaalista tapahtuu keskipakorummussa, laskeutus- ja saostusaltaissa sekä suodattamalla.

**Teollisissa laskeutusaltaissa** voidaan saostusta käyttämällä poistaa sora ja hieno siltti aina 10–20 µm:iin saakka. Partikkelit laskeutuvat painovoiman vaikutuksesta. Parissa viikossa (10–14 vrk) voidaan saavuttaa jopa 40 %:n kiintoainepitoisuus. Veden poistumista voidaan tehostaa alipaineella (USEPA, 1993).

**Keskipakoinen vedenpoisto** soveltuu 10 µm:ä suurempien partikkelien erottamiseen. Hienojakoisen aineksen lisäksi kuitupitoisen aineksen vedenpoisto on hankalaa, joten tämä menetelmä ei sovellu saastuneiden sedimenttien vedenpoistoon (USEPA, 1993).

Kolme yleisimmin käytettyä **suodatusmenetelmää** ovat hihna- (belt press filtration), imu- (vacuum rotatory filtration) sekä painesuodatus (pressure filtration). Tietoa menetelmien soveltuvuudesta ruopattujen sedimenttien vedenpoistoon on vain rajoitetusti (USEPA, 1993).

Vedenpoiston yhteydessä on varmistettava, ettei haitallisia aineita joudu poistetun veden mukana vesistöön tai maaperään. Siksi myös poistettu vesi on puhdistettava.

#### 4.4.2 Sedimentin seulonta

Sedimentistä poistetaan partikkelit, jotka eivät sovellu saastuneiden sedimenttien käsittelyprosessiin. Lisäksi yleensä haitalliset aineet ovat sitoutuneet hienojakoiseen materiaaliin, kuten saveen tai orgaaniseen aineeseen. Tällöin karkeampia kitkamaalajeja voidaan käsitellä lähes saastumattomina, ja ne voidaan läjittää lähes käsittelemättöminä. Karkeampi maa-aines seulotaan (USEPA, 1993).

## **4.5 Saastuneiden sedimenttien (dioksiinit ja furaanit) käsittely**

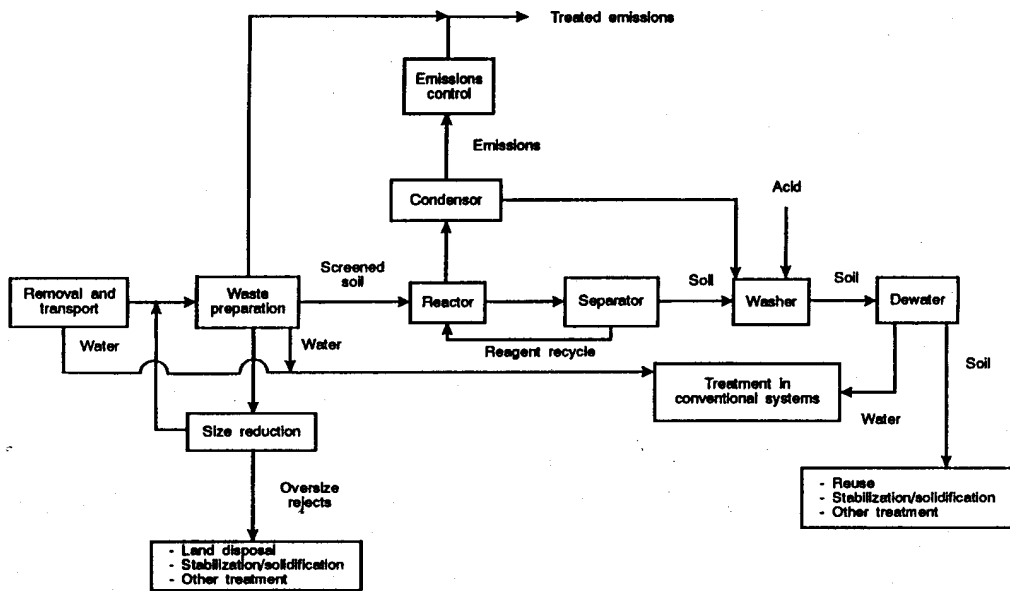
Saastuneiden sedimenttien käsittelymenetelmiä käsitellään U.S. Environmental Protection Agencyn (1993) julkaisussa 'Selecting Remediation Techniques for Contaminated Sediment'. Julkaisussa esitellään seuraavat käsittelymenetelmät: biologinen, dekloraus (kloorin poisto), maa-aineksen pesu, liuottimilla uuttaminen (solvent extraction), kiinteytys (solidification/stabilization), poltto (incineration) sekä termodesorptio (thermal desorption).

Menetelmien käytöstä dioksiinien ja furaanien puhdistukseen todetaan, että dekloraus ja poltto ovat tehokkaita tietyissä olosuhteissa ja puhdistusskaalassa. Maa-aineksen pesua, liuottimilla uuttamista ja termistä desorptiota ei ole kehitetty, mutta asiantuntijoiden mukaan menetelmät saattavat toimia. Muiden menetelmien (biologisen käsittelyn, kiinteytyksen) ei ole todettu olevan toimivia (USEPA, 1993).

DiGasparro et al. (1998) ovat tutkineet uuttamisen käyttöä dioksiinien ja furaanien poistamiseen sedimenteistä. Pilottihanketta testattiin New Yorkin ja New Jersey satamissa, ja menetelmällä saatiin poistettua yli 80 % dioksiineista ja furaaneista. Raskasmetallien käsittelyyn vaaditaan muita poistotekniikkoja, kuten kemiallinen uuttaminen ja kiinteytys.

### **4.5.1 Kloorin poisto (dechlorination)**

Kloorin poisto soveltuu tiettyjen aromaattis-orgaanisten myrkyllisten epäpuhdistuksien poistamiseen, erityisesti dioksiinien ja PCB:n. Saastuneet sedimentit kuumennetaan (noin 150 °:seen) ja sekoitetaan reagenssin kanssa, joka sisältää kalium- tai natriumhydroksidia (KOH, NaOH) ja polyeteeniglykolia (PEG). Menetelmällä ei voida käsitellä korkeita pitoisuuksia sisältäviä sedimenttejä (Kuva 33). Vuonna 1993 kloorin poiston kustannukset olivat 260–650 US\$/m<sup>3</sup> (USEPA, 1993).



Kuva 33. Kloorin poiston (KPEG) tyypillinen prosessikaavio (USEPA, 1993).

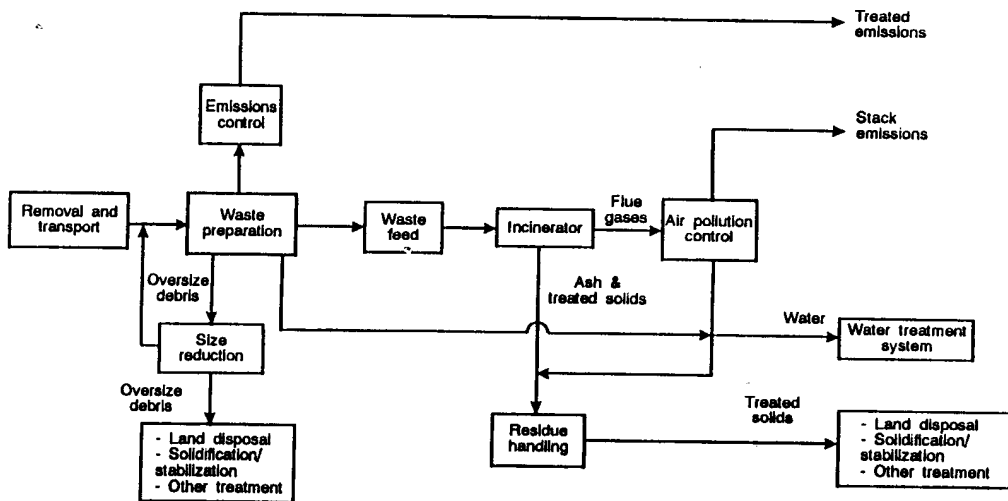
#### 4.5.2 Polttaminen (incineration)

Polttaminen soveltuu mm. dioksiinien ja furanien sekä PCB:n käsittelyyn. Poltto tapahtuu noin 500–700 °C:ssa, ja kolme yleisintä menetelmää ovat kierto-uuni (rotary kiln), kiertävä leijukerros (circulating fluidized bed) sekä erilaiset infrapunaohjatut lämmityselementit. Kiertävä leijukerros ei vaadi jälkipoltto-kammiota, muissa menetelmissä tämä on tarpeen. Polton järjestelyt esitetään kuvassa (Kuva 35). Raskasmetallit, kuten elohopea, eivät tuhoudu palamisessa. Poltossa elohopea höyrystyy ja vapautuu savukaasujen mukana. Vuoden 1993 kustannustasossa polton kustannukset olivat suurissa kohteissa noin 620 US\$/m<sup>3</sup> ja pienissä noin 800 US\$/m<sup>3</sup> (USEPA, 1993).

Vuosina 1994–1995 hävitettiin polttamalla noin 10 000 tonnia Sköldvikin muovi-tehtaiden käytöstä poistettujen jätealaiden dioksiini- ja furanipitoista lietettä (Vartiainen et al., 1997).

Taulukossa 6 esitellään eri parametrien vaikutus deklorauksen ja polton suorittamiseen (Taulukko 10).





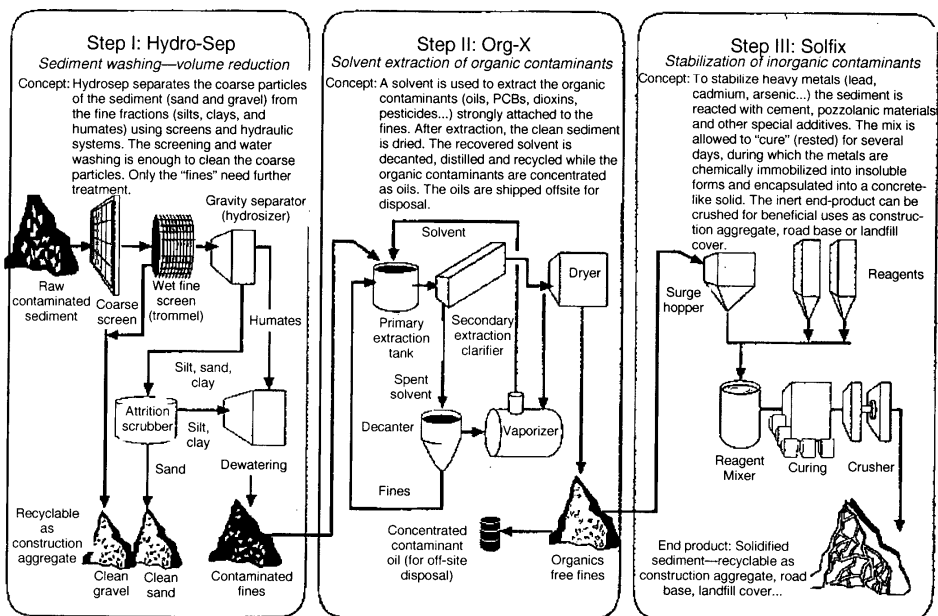
Kuva 35. Sedimenttien polton järjestelyt (USEPA, 1993).

Taulukko 10. Parametrien vaikutus dekloraukseen ja polttoon (USEPA, 1993).

Parametri	Kloorin poisto (dechlorination)	Poltto (incineration)
Savipitoisuus	Pidentää reaktioaikaa	Ei tunnettua vaikutusta
Humuspitoisuus	"	Ei vaikutusta
Metallipitoisuus	Lisää reagenssin käyttöä	Höyrystyvät metallit voivat kaasuntua
Partikkelien koko	Ei näkyvää vaikutusta	Hienoaines voi kulkeutua prosessin läpi
pH	> 2	Alhainen voi aiheuttaa happo-vaikutuksen
Suolapitoisuus	Vaikuttaa reagenssin käyttöön	Ei tunnettua vaikutusta
Silttipitoisuus	Ei tunnettua vaikutusta	Voi kulkeutua prosessin läpi
Kuiva-ainepitoisuus	Vaikuttaa reagenssin käyttöön	Suurilla pitoisuuksilla prosessi on tehokkain
Jätteen koostumus	Tietyt klooratut alifaatit voivat tuottaa potentiaalisesti räjähtäviä yhdisteitä	Heterogeeninen koostumus voi vaikuttaa energian tarpeeseen
Vesipitoisuus	Jos >20 %, vaatii korkeampien reagenssien käyttöä	Korkea vesipitoisuus vaikuttaa materiaalin sisäänsyöttöön ja energian kulutukseen

### 4.5.3 Liuottimilla uuttaminen

Newton Creekin (New York) satama-altaasta ruopatut massat käsiteltiin liuottimilla uuttamalla. Sedimentti sisälsi mm. dioksiineja ja furaaneja (<0,001–0,1 mg/l) ja elohopeaa (< 0,001 mg/l). Sedimenttien käsittely tapahtui kolmessa vaiheessa (Kuva 37). Ensimmäisessä vaiheessa (step 1) poistettiin karkempi rakeinen maa-aines. Tässä vaiheessa ei ole tarpeellista poistaa vettä, jos kiintoainepitoisuus on suurempi kuin 30 %. Toisessa vaiheessa (step 2) uuttaminen tapahtui asetaatilla tai alkoholilla. Viimeisessä vaiheessa (step 3) uutettuun sedimenttiin lisättiin Portland-sedimenttiä. Lopputuotetta voitiin käyttää betonin runkoaineena, tienpohjana tai täyttömaan pintakerroksena. Uuttamisen ja stabiloinnin kustannukset ovat yhteensä noin 65 US\$/m<sup>3</sup>, jos käsiteltävän sedimentin määrä on noin 400 000 m<sup>3</sup> (DiGasparro et al., 1998).



Kuva 37. Dioksiinien ja furaanien käsittelyprosessi uuttamalla (DiGasparro et al., 1998).

## 5. Sedimentin kulkeutuminen

Partikkelikoko on tärkein fysikaalinen tekijä suspendoituneen sedimentin kulkeutumisen ja sen dynamiikan määrittävässä teoriassa, joko suoranaisesti tai epäsuorasti esim. laskeutumisnopeuden yhtälöissä.

### 5.1 Fysikaaliset perusteet

#### 5.1.1 Turbulenttinen virtaus

Prandtl on esittänyt turbulenttisen virtauksen sekoittumiselle empiirisen sekoittumispituuteen perustuvan yhtälön:

$$\tau(z) = \rho_w l^2 \left( \frac{\partial u(z)}{\partial z} \right)^2 \quad (1)$$

missä  $\tau$  on leikkausjännitys,  $\rho_w$  on veden tiheys,  $l$  on sekoittumispituus ( $= \kappa z$ ,  $\kappa =$  von Karman vakio  $\approx 0,4$ ),  $z$  on etäisyys pohjasta ja  $u$  on virtausnopeus. Pohjan lähellä leikkausjännitys on

$$\tau = \rho_w g h I \quad (2)$$

missä  $g$  on maan vetovoimakiinnyys,  $h$  on vesisyvyys ja  $I$  on kaltevuus. Tämä johtaa logaritmiseen virtausnopeusjakautumaan

$$u(z) = \frac{1}{\kappa} \sqrt{g h I} \ln(z / z_0) = 2,5 u^* \ln(z / z_0) \quad (3)$$

missä  $z_0$  on piste, jossa virtausnopeus = 0 logaritmisella profiililla ja  $u^*$  on leikkausnopeus.

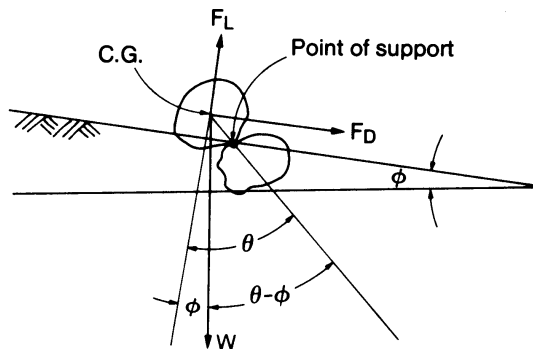
$$u^* = \sqrt{\tau / \rho_w} = \sqrt{g h I} \quad (4)$$

$z_0$ :n arvo on määritetty kokeellisesti sileälle ja karkealle pinnalle. Sileillä pinnoilla viskoosit voimat ovat määrääviä ja viskoosin alakerroksen (viscous sub-layer) paksuus,  $\delta$ , on  $11,6 \nu / u^*$  ja  $z_0 \approx 0,01 \delta \approx 0,1 \nu / u^*$  ( $\nu$  = kinemaattinen viskositeetti). Karkeille tasarakeisille pinnoille  $z_0 \approx 0,03 k_s$  ( $k_s$  = hiekkarakeiden koko). Tasarakeiselle sedimentille  $k_s = d$ , lajittuneelle sedimentille  $k_s = D_{65} - D_{90}$  ja pohjan aaltoisuudelle ja dyyneille  $k_s = 0,5 - 1 \times$  aallon tai dyynin korkeus.

### 5.1.2 Partikkelien liikkeellelähtö

Uoman pohjalla virtauksessa olevaan koheesiottomaan partikkeliin vaikuttavat hydrodynaaminen kitka  $F_D$ , hydrodynaaminen nostovoima  $F_L$  ja partikkelin paino veden alla  $W$  (Kuva 39). Kitka vaikuttaa virtauksen suunnassa, ja sen suuruus voidaan esittää muodossa  $c_1 \tau_0 d^2$  ( $c_1$  on vakio,  $d$  on partikkelin halkaisija). Liikkeellelähdön vastustavana voimana on partikkelin paino veden alla, joka voidaan esittää muodossa  $W = c_2 (\gamma_s - \gamma) d^3$  ( $c_2$  on vakio ja  $\gamma_s$ ,  $\gamma$  ovat sedimentin ja veden tilavuuspainot). Tasapainotilassa kriittinen leikkausjännitys  $\tau_c$  voidaan esittää yhtälön (5) mukaan (Breusers, 1988, Chang, 1988).

$$\tau_c = c (\gamma_s - \gamma) d \quad (5)$$



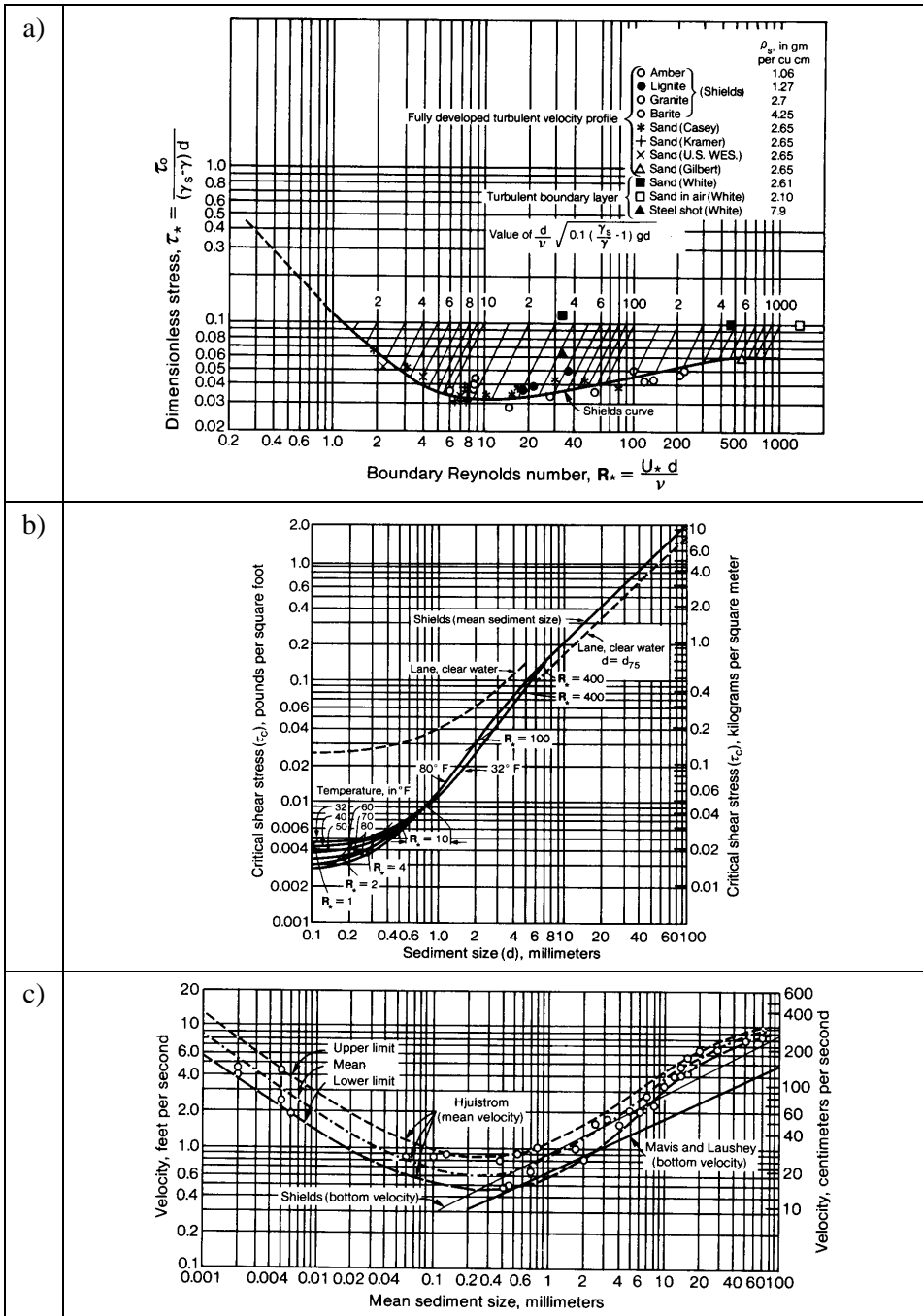
Kuva 39. Uoman pohjalla olevaan sedimenttirakeeseen vaikuttavat voimat (Chang, 1988).

Vuonna 1936 Shields tutki kourussa liikkeellelähtöä. Hänen tutkimustuloksiaan on esitetty nk. Shieldsin diagrammina (Kuva 41a). Pystyakselilla on yhtälön (5) perusteella muodostettu dimensioton suure ja vaaka-akselilla on rajakerroksessa määritetty Reynoldsin luku. Kuva 41b esittää Shieldsin käyrän perusteella määritettyä kvartsihiukkasten kriittistä leikkausjännitystä. (Chang, 1988, Breusers, 1988).

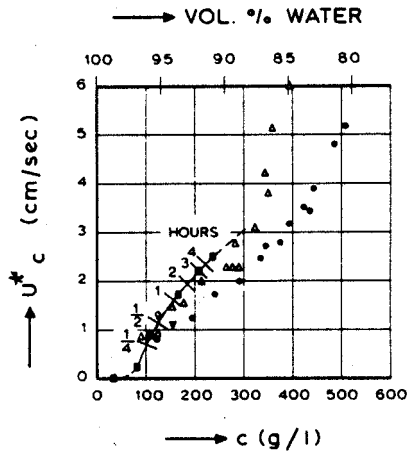
Chang (1988) on määrittänyt kvartsihiukkasten virtausnopeudet, jolloin partikkelit lähtevät liikkeelle (Kuva 41c), esim. hiekan  $d_{50}$  (0,125 mm) hiukkaset lähtevät liikkeelle 35–70 cm/s virtausnopeudella. Hiukkaskoon pienessä kasvaa liikkeelle lähdön virtausnopeus koheesion kasvaessa.

Breusersin (1988) mukaan koheesiomaalajien ( $d_{50} = 10\text{--}1\,000\ \mu\text{m}$ ) kriittinen leikkausnopeus  $u^*$  on 3,0–4,5 cm/s (0,9–2,0 N/m<sup>2</sup>). Kriittinen leikkausnopeus kasvaa siipikairalla määritetyn leikkauslujuuden ja plastisuusindeksin kasvaessa. Jokisuihin saostuneiden sedimenttien leikkausnopeuden minimiarvot ovat suuruudeltaan 1 cm/s (konsolidoituminen on kestänyt muutamia tunteja) – 3 cm/s (konsolidoituminen on kestänyt useita viikkoja) (Kuva 43).

Teeter (1993) on tutkinut New Bedfordin sataman hienojen sedimenttien ominaisuuksia. Jokivirtaus kuljettaa satama-altaaseen suhteellisen vähän sedimenttiä verrattuna vuorovesivirtaukseen (vaihtelu 1,1–1,4 m). Hienojakoisen sedimentin laskeutumisnopeudet ja kriittiset leikkausjännitykset esitetään taulukossa 7. Sataman sedimentti on herkkä eroosiolle (kriittinen leikkausjännitys < 0,7 N/m<sup>2</sup>).



Kuva 41. Sedimenttirakeiden liikkeelle lähteminen virtauksen voimasta. a) Shieldsin diagrammi, b) kvartsihiukkasten kriittinen leikkausjännitys sekä c) kvartsihiukkasten kriittinen virtausnopeus (Chang, 1988).



MUD :	SAND IN %	THICKNESS OF MUDLAYER IN cm
Δ „LA VILLAINÉ” (MIGNIOT, 1968)	8	12
● „MAHURY” (MIGNIOT, 1968)	2	12
—●— I	37	2
▼ II	7	20
○ III	2	2

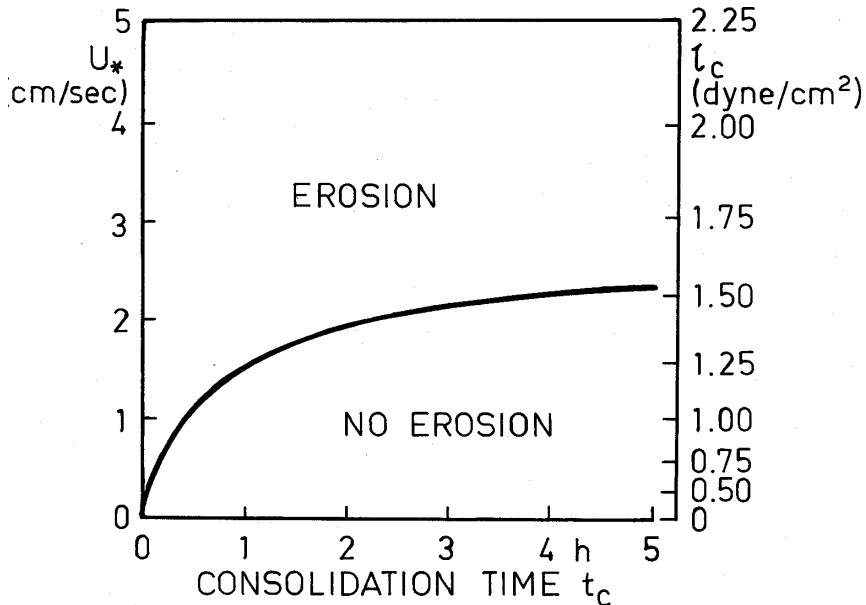
Kuva 43. Kriittinen leikkausnopeus,  $u^*$ , mudan eri konsentraatioissa (Breusers, 1988).

Taulukko 12. New Bedfordin sataman hienoaineksen ominaisuuksia (Teeter, 1993).

	Partikkelin halkaisija 28–74 $\mu\text{m}$	Partikkelin halkaisija 14–28 $\mu\text{m}$	Partikkelin halkaisija < 14 $\mu\text{m}$
Kriittinen leikkausjännitys sedimentoitumiselle [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]	0,42	0,33	0,043
Kriittinen leikkausjännitys eroosiolle [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]	>0,6	0,38	0,060
Laskeutumisnopeus [mm/s]	2,02	1,04	0,006

Huttula & Krogerus (1990) ovat määrittäneet Valkeakosken selluloosakuituja sisältävän sedimentin leikkauslujuudeksi ( $\tau_{\text{bmin}}$ ) 0,008  $\text{N}/\text{m}^2$ .

Konsolidaatiolla on huomattava merkitys leikkauslujuuteen partikkelien laskeutumisen jälkeisten ensimmäisten tuntien aikana (Kuva 45).



Kuva 45. Mudan konsolidaation vaikutus leikkausnopeuteen  $u^*$  ja kriittiseen leikkauslujuuteen  $\tau_c$  (Huttula et al., 1990).

Mudan eroosionopeudelle,  $E$  (kg/m<sup>2</sup> s), on esitetty seuraavia yhtälöitä (Breusers, 1988, Teeter, 1993):

$$E = 0,00021 (\tau / \tau_{cr}) \quad \text{Gironden muta } d_{50} = 2 \mu \text{ m} \quad (6)$$

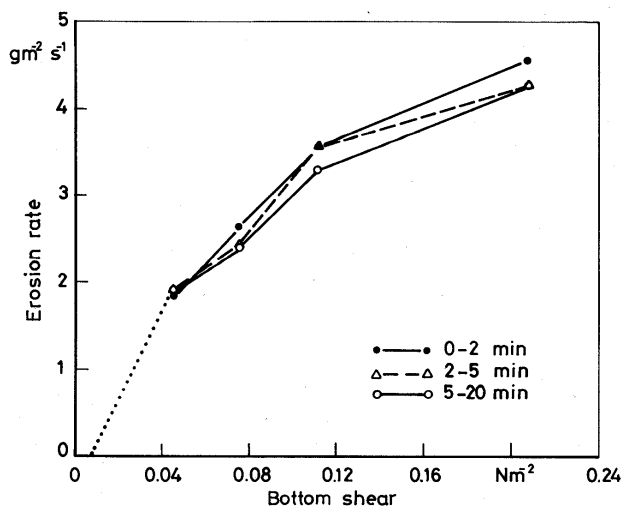
$$E = 0,0026 (\tau - \tau_{cr}) \quad \text{Jokisuistot Skotlanti, Australia, Indonesia} \quad (7)$$

$$E = 0,0005 \dots 0,005 \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \quad \text{USACE} \quad (8)$$

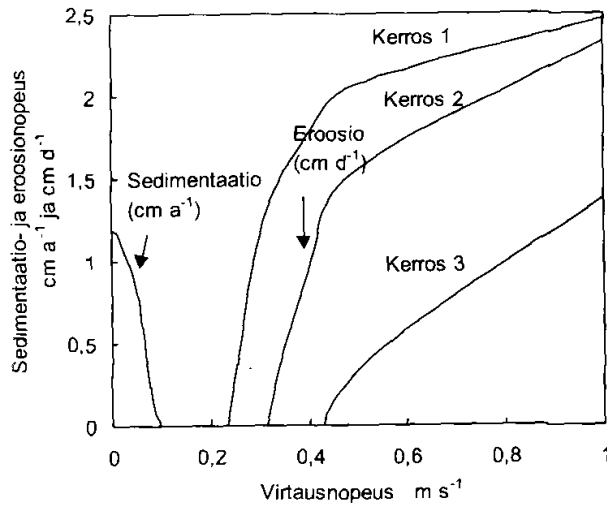
Yhtälö (7) soveltuu lyhytaikaisen eroosion määrittämiseen (<10 min). Yhtälöä (8) käytetään veteen läjitetyn sedimentin eroosion selvittämiseen. Yhtälö (8) pienemmällä kertoimella toteuttaa yhtälön (7), kun kriittinen leikkausjännitys on noin 0,19 N/m<sup>2</sup>.



Valkeakosken kuitupitoisten sedimenttien eroosionopeus on 2–5 g/m<sup>2</sup> s (Kuva 47) (Huttula & Krogerus, 1986). Kymijoen virtaus- ja sedimenttimallituksessa (Verta et al., 1999) käytetään pintakerroksen kriittisen leikkauslujuuden arvona 0,5 N/m<sup>2</sup> ja sedimentaatio- ja eroosionopeudelle kuvan kaavion arvoja (Kuva 49).

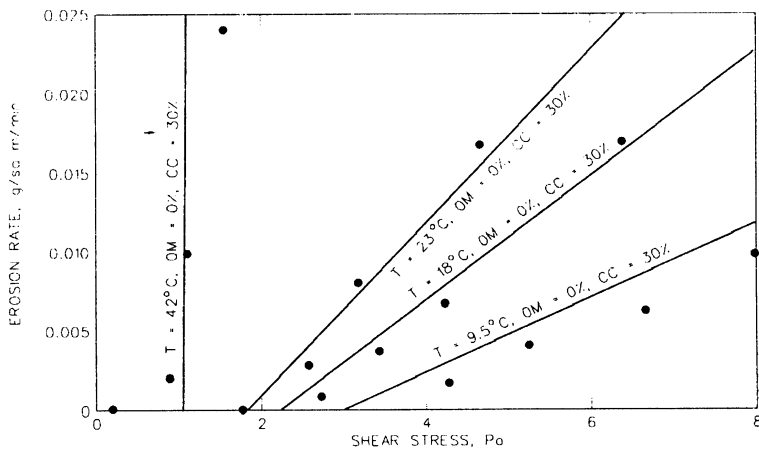


Kuva 47. Valkeakosken kuitujen eroosion määrä erilaisilla leikkausjännityksen arvoilla (Huttula & Krogerus, 1986).



Kuva 49. Kymijoen numeerisissa laskennoissa käytetty laskennallinen sedimentaatio- ja eroosionopeus virtausnopeuden funktiona (Verta et al., 1999).

Veteen läjitetyn hienojakoisen sedimentin eroosioherkkyyteen vaikuttavat sedimentin tiheys, orgaanisen aineksen pitoisuus, savipitoisuus ja lämpötila. Lämpötila vaikuttaa huomattavasti mudan eroosioon. Lämpötilan laskiessa mudan eroosionopeus pienenee (Kuva 51) (Teeter, 1992).

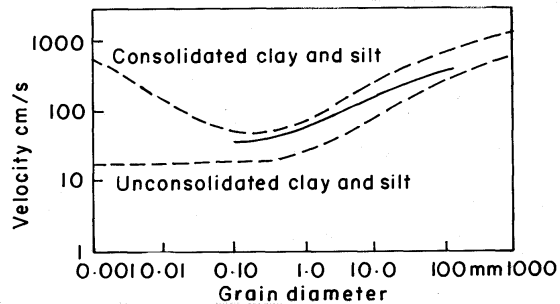


Kuva 51. Lämpötilan vaikutus mudan eroosionopeuteen (Teeter, 1992).

RIL:n (1982) julkaisussa esitetään seuraavia erilaisten uomien suurimpia sallittuja nopeuksia:

- hietamaa, liejusavi 0,30 m/s,
- hieno hiekkamaa 0,35 m/s.

Konsolidoitumisen vaikutus partikkelien liikkeelle lähtöön on huomattava (Kuva 53).



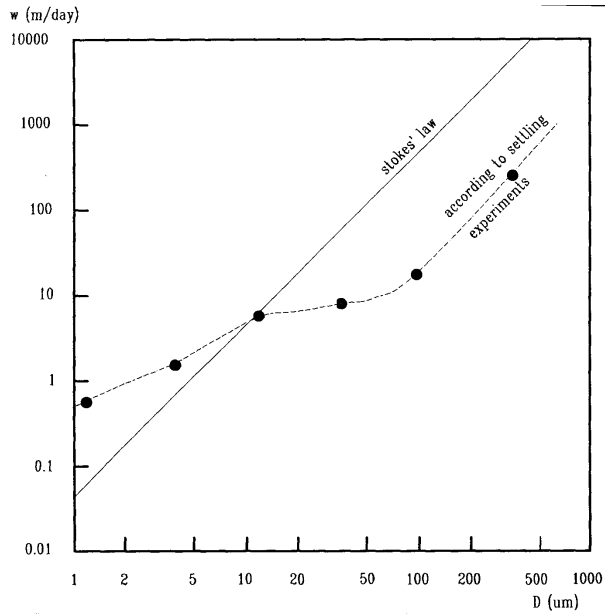
Kuva 53. Konsolidoitumattoman saven ja siltin kriittinen virtausnopeus eroosiolle (Huttula et al., 1990).

### 5.1.3 Partikkelien laskeutumisnopeus

Hienoaineksen ( $< 100 \mu\text{m}$ ) laskeutumisnopeus,  $w$ , voidaan määrittää Stokesin lain (9) perusteella (Breusers, 1988).

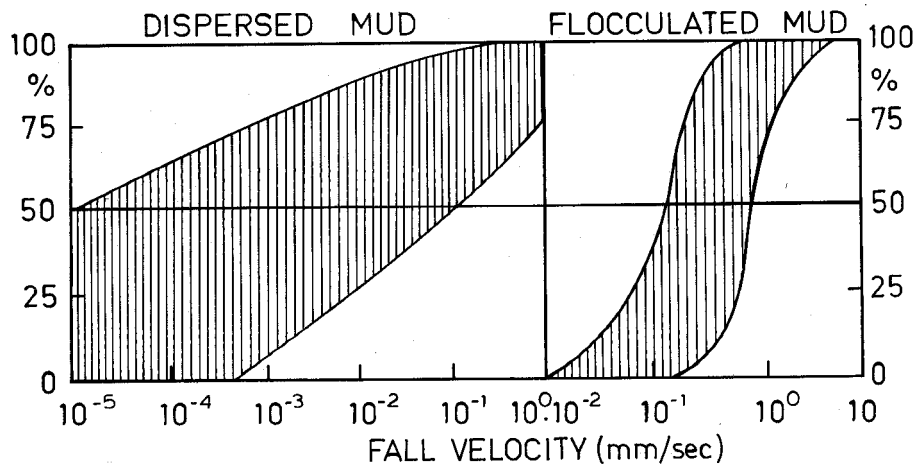
$$w = \frac{(\rho_s - \rho) g d^2}{18 \eta} \quad (9)$$

missä  $\rho_s$  ja  $\rho$  ovat sedimentin ja veden tiheydet,  $d$  on partikkelin koko ja  $\eta$  on veden dynaaminen viskositeetti. Hienojakoisen aineksen laskeutumisnopeus saattaa poiketa Stokesin lain mukaan määritetystä. Tämä johtuu siitä, että hienojakoinen aines ei ole välttämättä pyöreärakeista (Kuva 55).



*Kuva 55. Kokeiden ja Stokesin lain perusteella määritetty laskeutumisnopeus (Huttula et al., 1990).*

Vedessä olevat muut partikkelit hidastavat yksittäisten partikkelien laskeutumisesta. Toisaalta yhdistyneiden partikkelien ja flokkien laskeutumisnopeus on suurempi. Flokkuloituneen mudan laskeutumisnopeus on 0,4–1,8 m/h (Kuva 57).



Kuva 57. Mudan yksittäisten ja flokkien laskeutumisnopeus. Mudaksi on määritelty kaikki aines, jonka koko on pienempi kuin  $50 \mu\text{m}$  (Huttula et al., 1990).

Huttula ja Krogerus (1986) ovat määrittäneet Valkeakosken kuitupitoisten sedimenttien laskeutumisnopeudeksi  $0,80 \text{ m/h}$  ( $d_{50}$ ). Pintasedimentin vesipitoisuus oli 94–99 % ja orgaanisen aineksen osuus 45–72 %.

#### 5.1.4 Suspension kulkeutuminen

Hienoaines suspendoituu veteen aiheuttaen veden samentumista. Suspendoitunut aines kulkeutuu virtausten mukana. Suspendoituneen sedimentin jakautuma vesipatsaassa määräytyy syöpyneen maalajin rakeisuuskäyrän ja ainesten laskeutumisnopeuden perusteella (Kuva 59).

Wrenin ja muiden (2000) mukaan suspendoitunut hieno sedimentti ( $>0,062 \text{ mm}$ ) on sekoittunut virtauksessa koko poikkileikkauksen alueelle eikä sillä yleensä ole suuria äkillisiä vaihteluita ajan suhteen. Hiekan kulkeutumisessa sitä vastoin on ajan ja paikan suhteen vaihteluita.

Tasaisessa virtauksessa (uniform stedy flow) konsentraatiojakautuma voidaan esittää yhtälöllä

$$w C + \varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

missä yhtälön ensimmäinen termi esittää laskeutumisoimaisuuksia virtauksessa ( $w$  on partikkelin laskeutumisnopeus ja  $C$  on sedimentin tilavuuskonsentraatio) ja toinen termi turbulenssin diffuusiovaikutusta ( $\varepsilon_s$  on turbulентtinen diffuusio-kerroin). Jälkimmäinen termi kuvaa pystysuuntaista partikkelien nettokulkeutumista, joka on suhteellinen paikallisten konsentraatiogradienttien arvoon (Breusers, 1988).

Turbulenttinen diffuusiokerroin voidaan laskea kaavalla

$$\varepsilon_s = \kappa u^* z (1 - z/h) \quad (11)$$

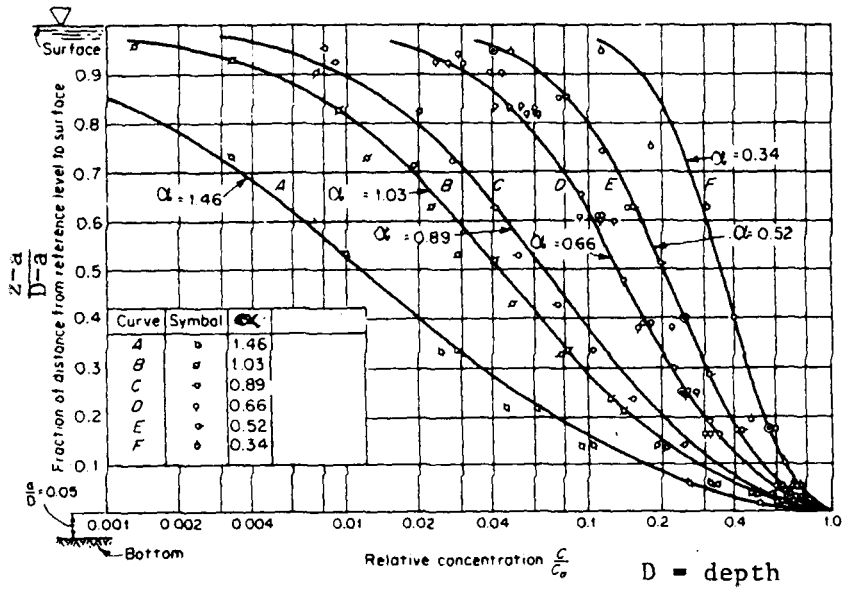
Yhtälöiden perusteella saadaan

$$\frac{C(z)}{C(a)} = \left( \frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^\alpha \quad (12)$$

missä  $\alpha = W / \kappa u^*$ ,  $a$  on vertailutaso, jonka  $C = C(a)$ .

Kuvassa esitetään tulokset graafisesti (Kuva 59) ja taulukossa  $\alpha$ -kertoimen vaikutus suspension jakautumaan (Taulukko 13). Seuraavat kommentit on otettava huomioon yhtälöitä (10)–(12) käytettäessä (Breusers, 1988):

- Laskeutumisenopeuteen vaikuttavat muut partikkelit ja virtauksen turbulenssi. Symmetrinen pystyvirtauksen vaihtelu aiheuttaa partikkeliin epäsymmetrisen kitkavoiman, joka pienentää laskeutumisenopeutta.
- Turbulenttinen diffuusiokerroin saa pohjalla ( $z = 0$ ) epärealistisen arvon 0.
- Referenssiarvoa  $C = C(a)$  ei ole määritetty.
- Suspensiopartikkelit vaikuttavat virtausnopeusjakautumaan.



Kuva 59. Suspendoituneen sedimentin jakautuminen (Breusers, 1988).

Taulukko 13. Suspendoituneen sedimentin jakautuminen yhtälön (12) erilaisilla kertoimilla (Breusers, 1988).

$\alpha = W / \kappa u^*$	$u^* / W$	Suspension muoto
1,6	1,5	vähäinen suspensio
0,8	3	konsentraatio ulottuu pintaan
0,25	10	täysin kehittynyt suspensio
0,06	40	melkein tasainen konsentraatio

### 5.1.5 Sedimentin kulkeutuminen

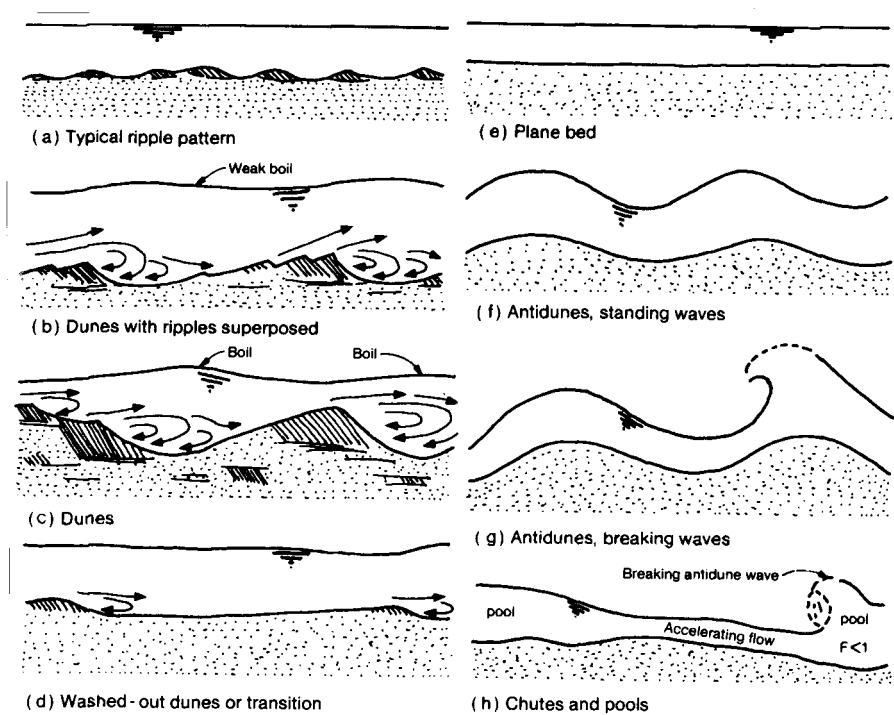
Sedimentin kulkeutumisen mekanismeina voidaan erottaa (Breusers, 1988):

- **pohjakulkeuma** (bed load): partikkelit liikkuvat *pohjaa* pitkin pyörimällä, liukumalla, pomppimalla, jne.
- **suspensio** (suspended load): partikkelit liikkuvat *veden* mukana. Partikkelien laskeutumisen estää virtauksen turbulenssin diffuusiovaikutus.

Sedimentin kulkeutuminen voidaan jakaa myös materiaalin alkuperän mukaan (Breusers, 1988):

- **uomamateriaalin kulkeutuminen** (bed-material transport): materiaali on peräisin uomasta, jolloin kulkeutuminen määräytyy materiaalin ja virtauksen mukaan (voi sisältää pojakulkeumaa ja suspensiota),
- **huuhtoutuminen, eroosio** (wash load): kulkeutuvat partikkelit ovat peräisin eroosiosta (yleensä  $<50 \mu\text{m}$ ) ja ne eroavat uoman pohjamateriaalista.

Uoman pohjan muodot määräytyvät sedimentin ja virtauksen voimakkuuden perusteella (Kuva 61). Pohjan muodoissa voidaan erottaa kaksi aluetta: alempi ja ylempi virtausalue.



Kuva 61. Pohjan muodot syöpyvässä uomassa (Chang, 1988).



Alemmassa virtausalueessa (lower flow regime) virtauksen Frouden luku ( $= u/\sqrt{g h}$ ) on pienempi kuin  $0,7 \pm 0,2$ . Tällöin voidaan erottaa

- matala pohja (flat bed),
- aaltoilu (ripples): sedimentin koko  $< 0,6$  mm. Aaltojen korkeus noin 1 cm ja pituus noin 5–10 cm.
- dyynit (dunes): leikkausjännityksen kasvaessa alkaa muodostua dyynejä, joiden aaltojen korkeus ja pituus kasvavat.

Virtausnopeuden kasvaessa dyynit huuhtoutuvat pois ja siirretään ylemmälle virtausalueelle (upper flow regime) (Frouden luku suurempi kuin  $0,7 \pm 0,2$ ), jolloin pohjan muotoina voidaan erottaa

- tasainen pohja (plane bed),
- antidyynit (antidunes), joita alkaa muodostua Frouden luvun lähestyessä 1,0:aa. Antidyynit 'liikkuvat' ylävirtaan ja niiden koko voi kasvaa ja ne voivat murtua aaltojen tapaan.
- kourut ja altaat (chutes and pools).

Sedimentin kulkeutumisen arvioimiseen on empiirisen tiedon perusteella muodostettu useita yhtälöitä. Pohjakulkeutuman arvioimiseen ovat mm. seuraavat yhtälöt:

- Du Bois, 1879,
- Kalinske, 1947,
- Meyer, Peter & Muller,
- Einstein, 1950

ja kokonaiskulkeutumisen arvioimiseen mm.

- Engelund & Hansen, 1967,
- Ackers & White, 1973,
- van Rijn.

## 5.2 Sedimentin kulkeutuminen Kymijoessa

Vuonna 1997 Kymijoessa Keltin kohdalla kulkeutui noin 24 000 tonnia kiintoainesta ja merialueelle päätyi noin 61 000 tonnia (Verta et al., 1999). Keltissä virtauksen mukana kulkeutuu noin 0,76 kg/s eli keskimäärin noin 2,5 mg/l. Jansenin ja muiden (1979) mukaan sedimentin kulkeutuminen vaihtelee Keski-Euroopan joissa huomattavasti. Se on esim. Reinin delta-alueella on 10 mg/l ja Rhone-joella 200 mg/l. Suurten Järvien laskujoessa St. Lawrenceassa sedimentin kulkeutuminen on 7 mg/l.

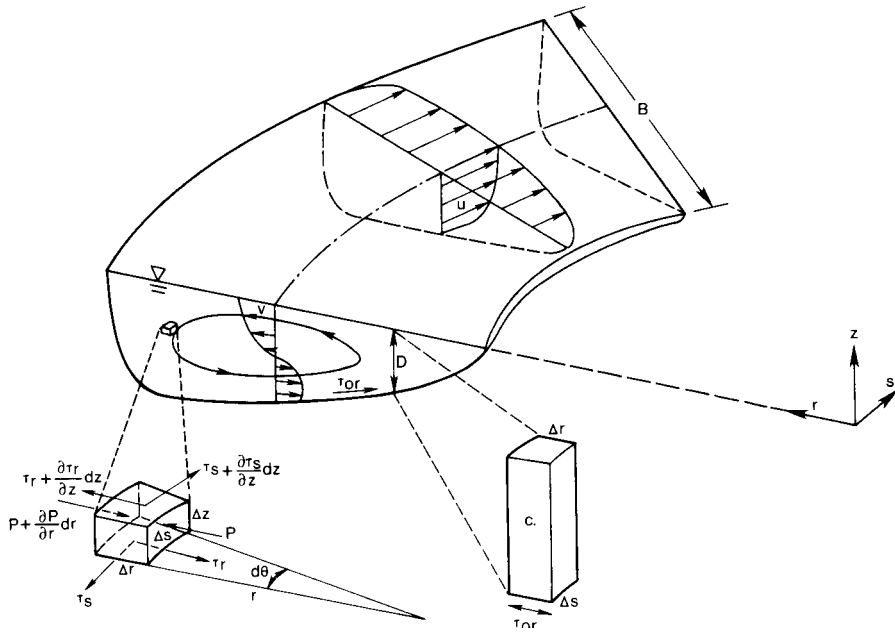
## 5.3 Irtoavan kiintoaineen leviäminen

Irtoavan kiintoaineen leviämiseen vaikuttavat mm. veden lämpötila, suolapitoisuus, virtausnopeus sekä suspendoituneen materiaalin koko.

Englannin kanaalissa tehdyissä tutkimuksissa suspendoituneen sedimentin karkearakeisemman aineksen pitoisuus ( $>0,063$  mm) pieneni taustakulkeutuman tasolle noin 200–500 metrin päässä kohteesta. Hienojakoinen aines ( $<0,063$  mm) levisi huomattavasti laajemmalle alueelle. Vastaavasti Tanskassa Kriegers Flakin ruoppauksissa virtausten nopeus oli noin 0,1 m/s, jolloin valtaosa sedimenteistä laskeutui ( $>0,063$  mm) lähialueelle (Herrmann et al., 1999).

Leviävän suspension sameuteen vaikuttavat lieju- ja silttipitoisuus sekä virtauksen turbulenssi. Rauhallisesti virtaavilla alueilla ruoppauksen on todettu lisäävän sameutta 8–400-kertaiseksi (Herrmann et al., 1999).

Kymijoen olosuhteissa irtoavan kiintoaineen leviäminen voidaan arvioida käyttämällä julkaisussa Verta et al. (1999) esitettyä 1-dimensionaalista virtaus- ja sedimentinkulkeutumismallia. Suurin osa kiintoaineksesta tulee kulkeutumaan päävirtauksen mukana mereen. Suurimpien pitoisuuksien alueella (Kuusankosken alapuolella) sedimentin liikkeellelähdön selvittäminen edellyttää virtaustarkasteluja 2-dimensionaalisella mallilla. 2-D mallia voidaan käyttää myös sedimentoitumisen arvioimiseen uoman laajentumiskohdissa esim. Myllykosken alapuolella. Uoman kaarteissa poikittaiset sekundääriveritukset voivat aiheuttaa sedimentaatiota, jonka suuruutta voidaan arvioida virtausmittausten avulla (Kuva 63).



Kuva 63. Virtaus uoman kaarteessa. Kaarteensuuntaisen virtauksen lisäksi muodostuu poikittainen sekundäärivirtaus, joka saattaa aiheuttaa sedimentaatiota (Chang, 1988).

## 6. Ruoppaustyö virtaavassa vedessä ja sen vaikutus maa-aineksen irtoamiseen

### 6.1 Aikaisemmat selvitykset

Keravanjoen Matarinkosken yläpuolella suoritettiin vuosina 1991–1992 ruoppaustyötä lähinnä tulvahaittojen vähentämiseksi. Ruoppauksissa poistettiin noin 70 000 m<sup>3</sup> savimaita. Ruoppaustyön vaikutuksia arvioitiin mittaamalla irtoavan kiintoaineksen määrää ja vaikutuksia säätelevät tekijät pyrittiin määrittämään. Kaivumassoista otettiin näytteitä, ruoppaustyössä irtoava kiintoaine määritettiin uoman pohjalle sijoitetuilla keräysputkilla ja otettiin vesinäytteitä (Virtanen et al., 1992).

Keravanjoella ruoppaustyön (kuokkakauha, pitkäpuominen ja jatkettu kuokka sekä lyhyen aikaa laahakauha) vaikutuksesta kiintoaineen määrä kasvoi 100 tonnista 350 tonniin vuorokaudessa. Taulukossa esitetään virtausnopeuden ja irtoavan kiintoaineksen riippuvuus (Taulukko 15). Keravanjoen selvityksen mukaan ruoppaustyössä irtoamisprosessissa on erittäin paljon tuntemattomia kysymyksiä. Ruoppaustapahtuman virtausvaikutuksia ei katsottu tarpeelliseksi lähteä selvittämään tarkemmin (Virtanen et al., 1992).

*Taulukko 15. Keravanjoella ruoppaustyössä määritetty irtoavan kiintoaineksen määrä eri virtausnopeuksilla. Maamassojen tilavuuspainona on 1 300 kg/m<sup>3</sup> (Virtanen et al., 1992).*

Virtausnopeus [m/s]	Vapautumisosuus [%]
<0,06	<0,5
0,10	1
0,20	2,3
0,40	11

Taulukon tulosten perusteella voidaan todeta, että vapautuvan kiintoaineksen prosenttiosuuden suuruus on verrannollinen virtausnopeuden neliöön (0,6–0,7 u<sup>2</sup>).

Rantakangas (1992) on tutkinut Kalajoen Hamarinkosken perkauksien aiheuttamaa kiintoaineen liettymistä ja laskeutumista. Ruopattavat massat olivat keskitiivistä moreenia, jonka keskimääräinen savipitoisuus oli noin 15,5 %. Tutki-

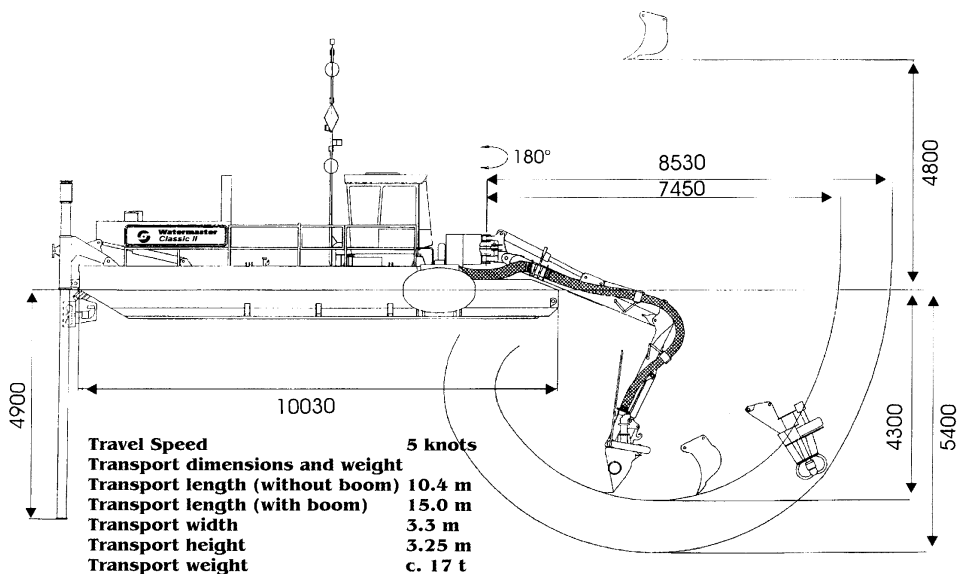
muksessa kokeiltiin suodatinkankaiden käyttöä hienoaineksen leviämisen estämiseksi. Joen virtaus oli kuitenkin liian suuri (yli 0,5 m/s), joten suodatinkankaita ei saatu asetettua paikalleen. Suositeltava virtausnopeus suodatinkankaan käytölle on noin 0,25 m/s. Tutkimuksen perusteella liettyviä ruoppausmassoja oli noin 3–5 % kokonaismäärästä.

Rokoschin (1993) kokemusten perusteella silttiverhojen ei ole todettu olevan toimivia joko ekologisten tai taloudellisten näkökohtien perusteella.

Avoimen ja kahmari- ja kuokkakauhan aiheuttama samentuma on noin 2,5–3-kertainen suljettuun kauhaan verrattuna. Kuokkakauhan aiheuttama kiintoainepitoisuus välittömästi ruoppaajan takana oli 170 mg/l (Amsterdam–Reinkanaali). Kahmarikauhan takana on mitattu samansuuruisia pitoisuuksia.

## 6.2 Kenttäkokeessa tarkasteltavat ruoppausmenetelmät

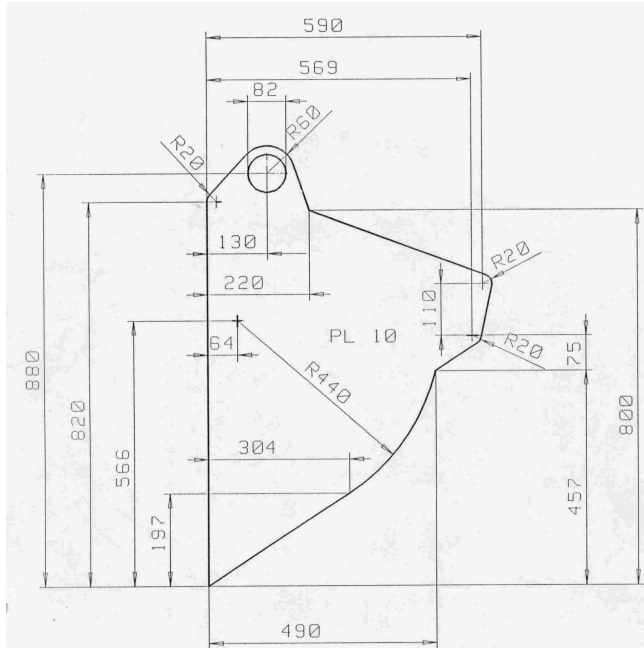
Kenttäkokeissa kaivavana koneena käytetään Vesimestaria (Kuva 39), jonka normaalivarustus on pumppukauha. Kokeissa samaan laitteeseen vaihdetaan myös avoin ja suljettu kuokkakauha sekä suljettu kahmarikauha.



Kuva 65. Kenttäkokeessa käytettävän Vesimestarin mitoitus (lähde: Aquamec Ltd.).

### 6.2.1 Avoin ja suljettu kuokkakauha

Koeruoppauksessa käytettävän avoimen ja suljetun kuokkakauhan leveys on 1 550 mm ja tilavuus 700 l (SAE). Kuokkakauhan mitoitus esitetään kuvassa (Kuva 66).

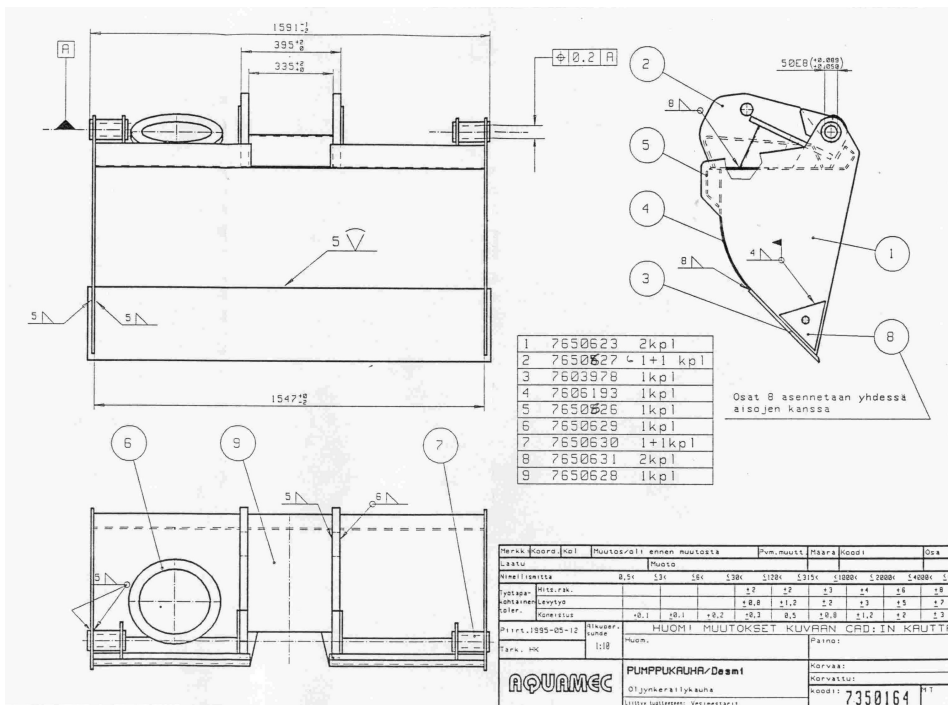


Kuva 66. Kuokkakauhan mitoitus (lähde: Suomen ympäristökeskus).

## 6.2.2 Pumppukauha

Pumppukauhan leveys on 1 600 mm ja tilavuus on 700 l. Mitoitus esitetetään kuvassa (Kuva 68).

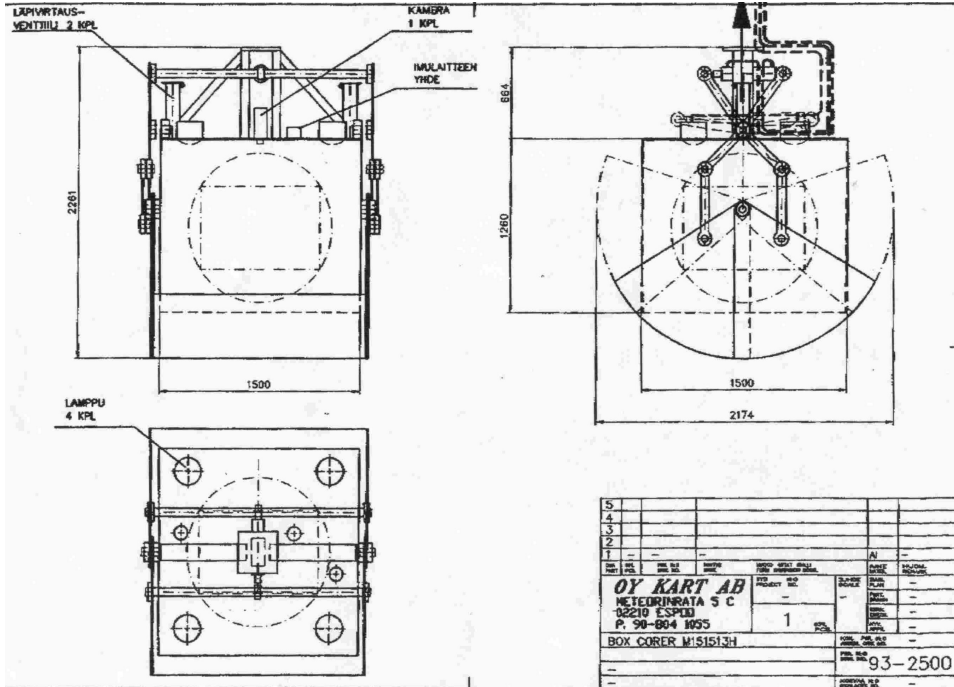
Pumppukauhan toimintaperiaate on seuraavanlainen: Pumppukauha lasketaan ruopattavaan sedimenttiin. Kauha siirretään eteenpäin pumpun siirtäessä ruoppausmassat ylös proomuun tai putkilinjaan. Kauha liikutetaan sedimentin sisässä sen ulottuman verran pumppujen toimiessa. Kauha siirretään uuteen paikkaan ja ruoppaustyö jatkuu.



Kuva 68. Pumppukauhan mitoitus (lähde: Aquamec Ltd.).

### 6.2.3 Suljettu kahmarikauha

Suljetun kahmarikauhan tilavuus on noin neljä kertaa suurempi kuin muiden ruoppauskokeissa käytettävien eli 2 840 l. Kauhan pituus avattuna on 2 174 mm ja suljettuna 1 900 mm sekä leveys 1 600 mm. Laatikko-osan pituus ja leveys ovat kumpikin 1 500 mm (Kuva 70).



Kuva 70. Suljettu kahmarikauha (lähde: Oy Kart Ab).

### 6.2.4 Ruoppajien työkierrat

Erkki Mykkänen, Syke, on laatinut kenttäkokeessa tarkasteltavien laitteiden työkierrat. Työkierrat on tehty 17–20 tonnin kaivureista tehtyjen työtutkimusten perusteella. Laitteiden peruskierto on 29–72 sekuntia (Taulukko 17). Pumppukauhalla ruoppausmassoja ei siirretä ylös kauhalla vaan pumppaamalla, joten sen peruskiertoa on sovellettu muita vastaavaksi.



Taulukko 17. Kenttäkokeissa käytettävien ruoppaajien peruskiertoajat (Erkki Mykkänen, Suomen ympäristökeskus).

Ruoppaaja	Kuokka-kauha	Suljettu kuokka-kauha	Pumppu-kauha	Kahmari-kauha
Kauhan täyttö [s]	10	15	10	20
Kääntyminen kauha täynnä [s]	6	6	0	10
Kauhan tyhjennys [s]	3	8	60	8
Kääntyminen kauha tyhjänä [s]	10	10	2	10
<b>Yhteensä [s]</b>	<b>29</b>	<b>39</b>	<b>72</b>	<b>48</b>

## 6.3 Ruoppaajan vaikutus irtoavaan kiintoainekseen

### 6.3.1 Kymijoen sedimenttien ominaisuudet

Kohdassa 2.3.2 on esitetty Kymijoen eri osien sedimenttien raekokojakautumia. Keskimääräinen raekoko  $d_{50}$  on valtaosassa näytteistä 20–110  $\mu\text{m}$ . Valitaan tarkastelun kohteeksi kolme raekokoa: 20, 60 ja 110  $\mu\text{m}$ . Breusersin (1988) mukaan partikkeleiden leikkausnopeus,  $u^*$ , on 3–4,5 cm/s, jolloin leikkauslujuuden arvoksi saadaan 0,9–2,0  $\text{N/m}^2$ . Hiukan pienempiä leikkauslujuuden arvoja (0,06–0,6  $\text{N/m}^2$ ) Teeter (1993) on saanut New Bedfordin sataman sedimentille. Huttula & Krogerus (1986) ovat määrittäneet Valkeakosken kuitupitoiselle sedimentille leikkauslujuuden arvon 0,008  $\text{N/m}^2$ .

Stokesin lain mukaan (Kuva 55) 20  $\mu\text{m}$ :n partikkelin laskeutumisnopeus on noin 1,7 m/h. Flokkuloituneen mudan laskeutumisnopeus on 0,4–1,8 m/h ja Huttula & Krogerus (1986) ovat mitanneet Valkeakosken kuitupitoisen sedimentin laskeutumisnopeudeksi 0,8 m/h. Kymijoen virtaus- ja sedimenttimallituksessa (Verta et al., 1999) on käytetty pintakerroksen kriittisen leikkauslujuuden arvona 0,5  $\text{N/m}^2$ . Tarkasteluissa on käytetty alustavina arvoina taulukossa esitetyjä arvoja (Taulukko 19).

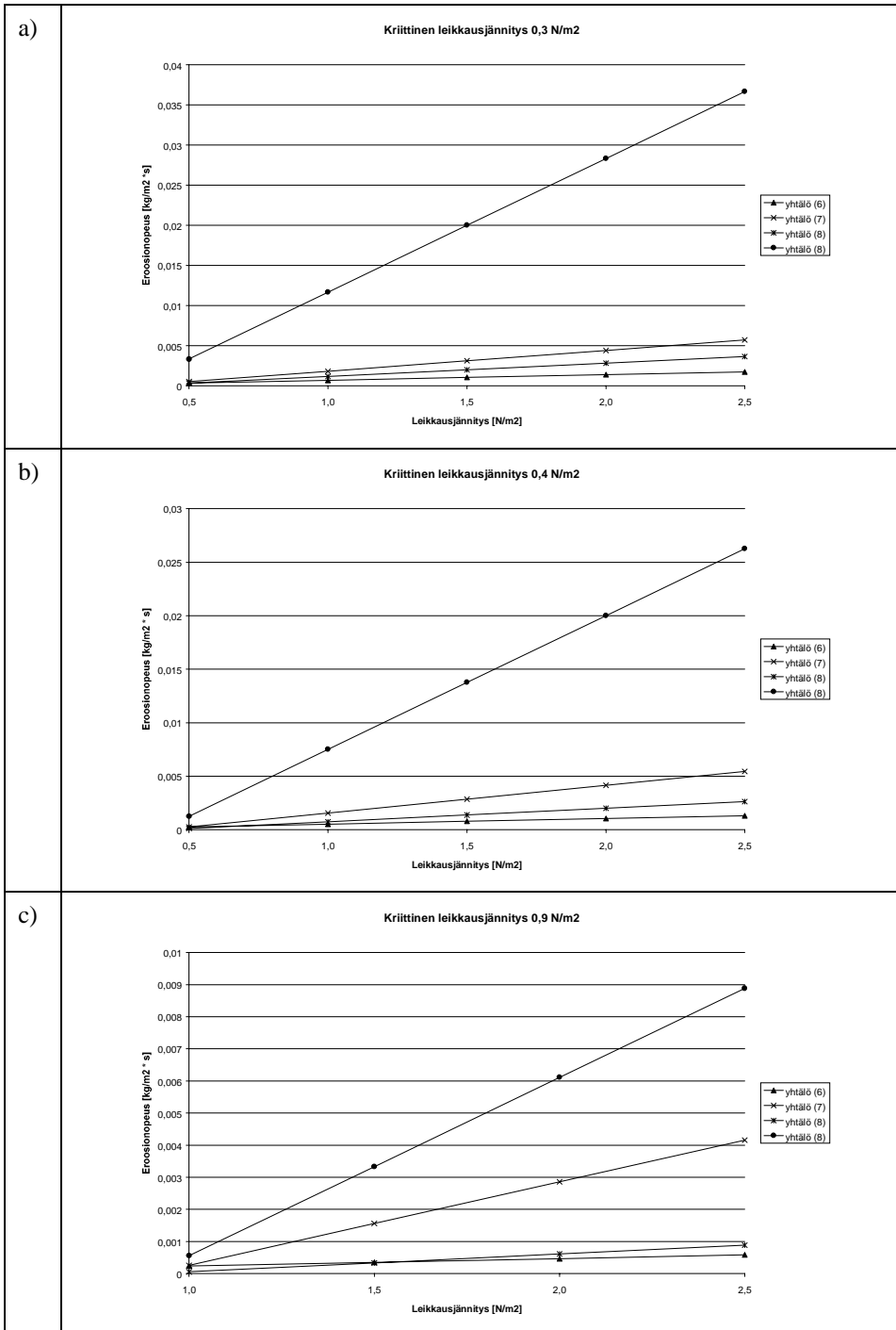
*Taulukko 19. Ruoppaajien vertailutarkasteluissa käytettyjä Kymijoen sedimenttien leikkauslujuuden ja laskeutumisenopeuden arvoja.*

	<b>Partikkelin halkaisija 20 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Partikkelin halkaisija 60 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Partikkelin halkaisija 110 <math>\mu\text{m}</math></b>
Kriittinen leikkausjännitys [N/m <sup>2</sup> ]	0,30	0,40	0,90
Laskeutumisenopeus [mm/s]	0,2	3,5	10,1

Kriittisten leikkauslujuuksien perusteella on tarkasteltu yhtälöiden (6)–(8) eroosionopeuden suuruutta (Kuva 72). Pienimmät eroosionopeudet saadaan Girondeen mudalle määritetyistä yhtälöstä (6). USACE:n yhtälö (8) antaa suuremmalla kertoimella (0,005) huomattavasti suurempia eroosionopeuksia kuin muilla yhtälöillä. Eroosionopeuden suuruuden arviointiin valitaan yhtälö

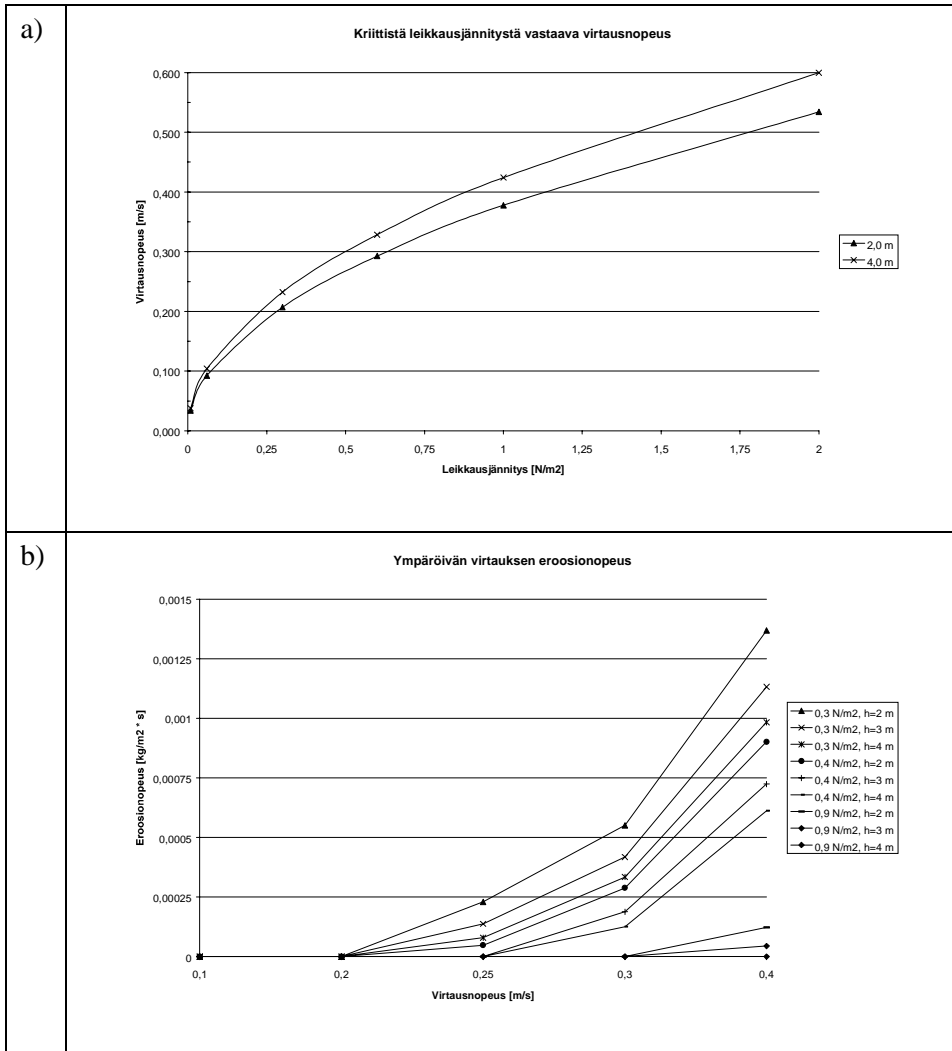
$$E = 0,0005 \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \quad (8)$$

Huttulan ja muiden (1990) määrittämän kuitupitoisen sedimentin kriittistä leikkauslujuutta (0,008 N/m<sup>2</sup>) vastaava virtausnopeus on noin 3,5 cm/s, kun pohjan leikkausjännityksen yhtälöön (2) sijoitetaan Manningin virtausnopeuden yhtälö (olettaen, että uoma leveä => R = h ja n = 0,03).



Kuva 72. Erosionopeus valittujen kriittisten leikkausjännitysten perusteella a) 0,3 N/m<sup>2</sup>, b) 0,4 N/m<sup>2</sup> ja c) 0,9 N/m<sup>2</sup>.

Kriittinen eroosiota aiheuttava virtausnopeus tulee valitulla leikkausjännitysalueella 0,3–0,9 N/m<sup>2</sup> olemaan noin 0,25–0,4 m/s (Kuva 74a). Tämän perusteella voidaan todeta, että virtausnopeus voi sedimentaatioalueilla olla enentään noin 0,4 m/s. Tätä suuremmalla virtausnopeudella uoman pohja alkaa syöpyä kaikilla valituilla leikkauslujuuden arvoilla. Eroosionopeus on tarkastelelalueella enintään noin 1,4 g/m<sup>2</sup>\*s, virtausnopeus 0,4 m/s ja kriittinen leikkausjännitys 0,3 N/m<sup>2</sup> (Kuva 74).



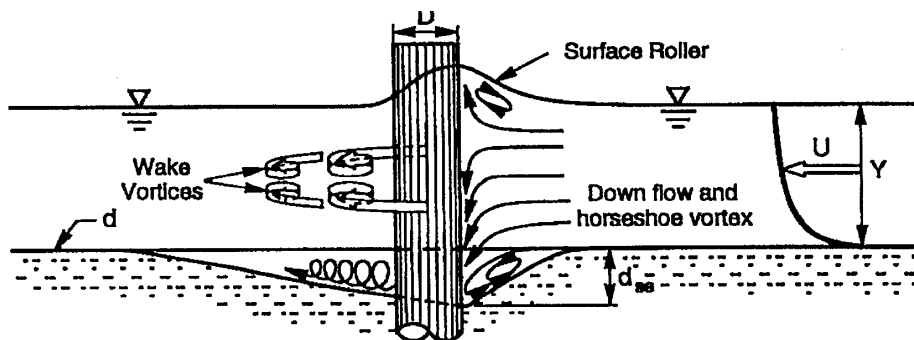
Kuva 74. Ruoppauskohteen virtauksen a) kriittinen leikkauslujuus pienillä virtausnopeuksilla sekä b) ympäröivän virtauksen eroosionopeus (kg/m<sup>2</sup>\*s).

Kymijoella saastuneet alueet sijaitsevat sedimentaatioalueilla, jotka ovat uoman laajentumissa (lahdet, järvimäiset alueet, jne). Dioksiinit ja furaanit sekä raskasmetallit ovat sitoutuneet hienojakoiseen maa-ainekseen. Ruoppaustyön aikana irtoava kiintoaine sekoittuu uoman laajentumassa vaikuttavaan 'akanvirtaukseen'. Osa kiintoaineksesta jää tähän 'akanvirtaukseen' ja lopulta laskeutuu takaisin ruoppausalueelle. Joen päävirtaukseen sekoittuva kiintoaineksen määrä riippuu uoman päävirtauksen ja pyörivän akanvirtauksen välisestä vedenvaihtuvuudesta. Jokivirtauksessa kiintoaine sekoittuu turbulenssin vaikutuksesta koko poikkileikkauksalalle ja samalla laimenee.

### 6.3.2 Ruoppaajan kiinnittymisen vaikutus

Kauharuoppaajien aiheuttamaan suspension määrään vaikuttaa työkierron pituus eli se aika, joka kuuluu kauhan täyttämiseen, nostamiseen, tyhjentämiseen ja laskemiseen pohjalle. Lisäksi ruoppaajan siirtäminen, tukijalkojen lasku jne aiheuttavat kiintoaineksen vapautumista.

Ruoppaajan tukijalat muuttavat virtauksen luonnetta. Tukijalan ylävirranpuolella vedenpinta nousee aiheuttaen paikallista padotusta. Tukijalan ympärille muodostuu hevosenkenkämäinen syövyttävä pyörre ja taakse vanavesipyörteet (Kuva 76). Vastaavanlainen ilmiö muodostuu virtauksessa olevien siltpilareiden ympärillä.



Kuva 76. Pilarin vaikutus virtaustilaan (Ettema et al., 1996).

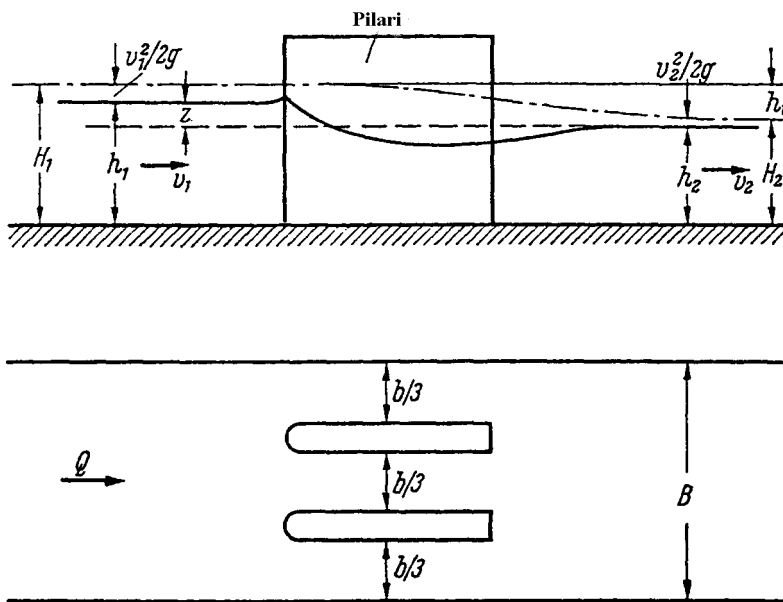
Virtauksen kohdatessa pilarin muodostuu etuosaan padotusta ( $z = h_1 - h_2$ ), ja pilarin kohdalla virtausnopeus kiihtyy (Kuva 78). Press ja Schröder (1966) ovat esittäneet pilarin ylä- ja alapuolisten vedenkorkeuksien suhteelle yhtälön

$$z = h_1 - h_2 = \frac{b}{B} [\delta - \alpha (\delta - 1)] c \frac{v_2^2}{2g} \quad (13)$$

missä  $\alpha$  = silta-aukon suhde kokonaisleveyteen (=  $(B-b)/B$ ),  $\delta$  on pilarin muoto-kerroin (suorakaiteenmuotoinen pilari 3,9) ja  $c$  on kokemusperäinen kerroin, jolle voidaan esittää yhtälö

$$c = (0,4 + \alpha + 9\alpha^3)(1 + Fr_2^2) \quad (14)$$

missä  $Fr_2$  on alavirranpuoleisen poikkileikkauksen Frouden luku (=  $u_2 / \sqrt{(g h_2)}$ ).



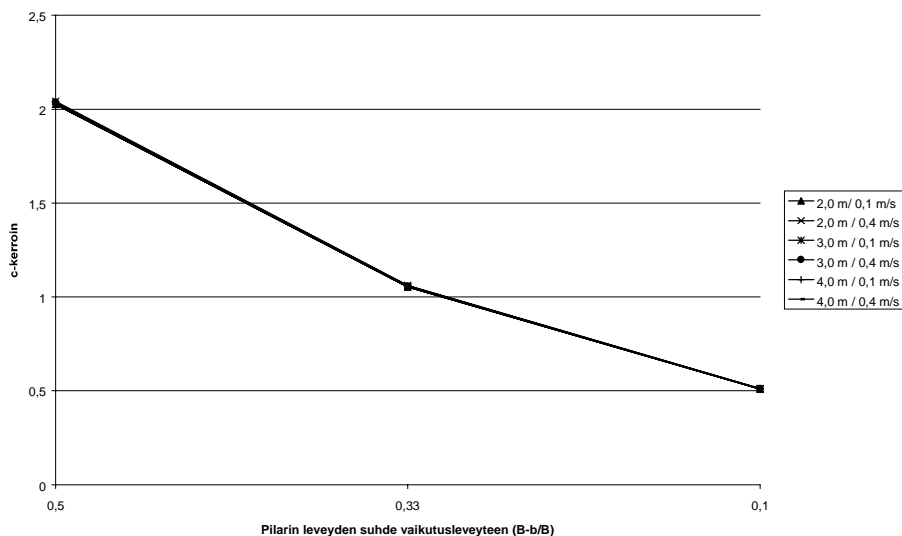
Kuva 78. Pilarin vaikutus virtaustilaan (Press & Schröder 1966).

Tukijalan leveys on erittäin pieni verrattuna virtauksen leveyteen. Tarkastelun lähtökohdana on, että tukijalan aiheuttama padotus lisää virtausnopeutta tukijalan

vieressä. Virtaus kiihtyy tukijalan sivuilla padotuksen vaikutuksesta. Tämä tapahtuu lyhyellä matkalla, jolloin kitkahäviöt ovat mitättömiä tukijalan aiheuttamaan paikalliseen häviöön verrattuna. Tämän perusteella virtausnopeuden lisäys saadaan lasketta nopeuskorkeuden avulla. Tämän jälkeen lasketaan eroosio tukijalan sivuilla muuttuneessa virtaustilassa.

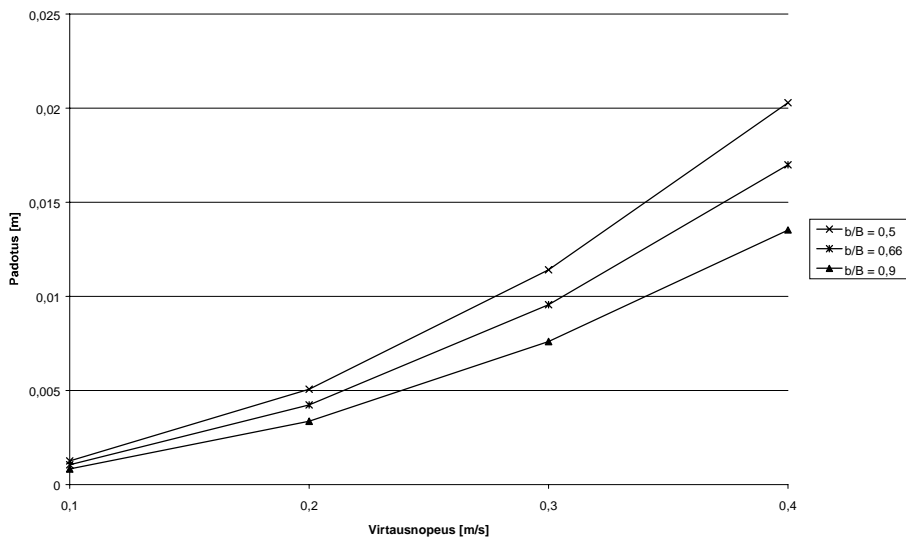
Tarkasteltaessa tukijalan vaikutusta virtaukseen on valittavalla vaikutusleveydellä suurempi vaikutus kuin Frouden luvulla, joka on 0,015–0,09 (tarkastelualue:  $h = 2\text{--}4\text{ m}$ ,  $u < 0,4\text{ m/s}$ ). Oletetaan, että padotuksen vaikutus ulottuu tietyn leveyden verran tukijalan kummallekin puolelle. Tarkasteltavina vaikutusleveyksinä ovat:

- puoli tukijalan leveyttä ( $b/B = 0,5$ ) kummallakin sivulla. Tällöin  $c$ -kertoimen suuruudeksi saadaan noin 2,03 (Kuva 80).
- tukijalan leveyden verran ( $b/B = 0,66$ ) kummallakin sivulla. Tällöin  $c$ -kerroin pienenee likimain arvoon 1,06.
- 4,5 kertaa tukijalan leveyden verran ( $b/B = 0,9$ ) kummaltakin sivulta. Tällöin  $c$ -kerroin saa arvon 0,51.



Kuva 80.  $c$ -kertoimen (yhtälö 14) suuruus erilaisilla aukkosuhteilla, kun vesisyvyys on 2–4 metriä ja virtausnopeus 0,1–0,4 m/s.

Yhtälöiden (13) ja (14) perusteella padotuksen suuruudeksi saadaan maksimissaan noin 20 mm, virtausnopeuden ollessa 0,4 m/s (Kuva 82). Kun padotus muutetaan nopeuskorkeuden avulla nopeuden lisäykseksi, saadaan virtausnopeuden kasvuksi ympäröivän virtauskentän pienillä nopeuksilla (0,1 m/s) 0,06–0,09 m/s ja suurilla (0,4 m/s) 0,25–0,35 m/s.



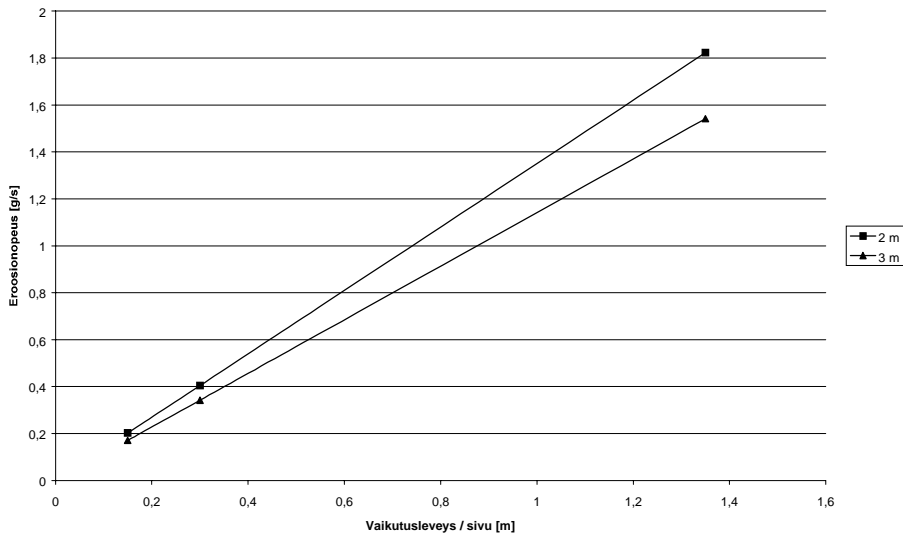
Kuva 82. Pilarin aiheuttama padotus laskettuna erilaisilla vaikutusleveyksillä ( $b/B$ ).

Seuraavassa kuvassa tarkastellaan tukijalan ( $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$ ) aiheuttamaa eroosiota erilaisilla vaikutusleveyksillä (Kuva 84). Vaikutusleveyden kasvaessa eroosionopeus kasvaa likimain lineaarisesti. Padotuksen aiheuttaman virtausnopeuden lisäys rajoittuu kapealle alueelle, joka voi olla arviolta tukijalan leveyden suuruisen. Tarkasteluissa valitaan vaikutusleveyden arvoksi tukijalan leveys, joka vaikuttaa kummallakin sivulla.

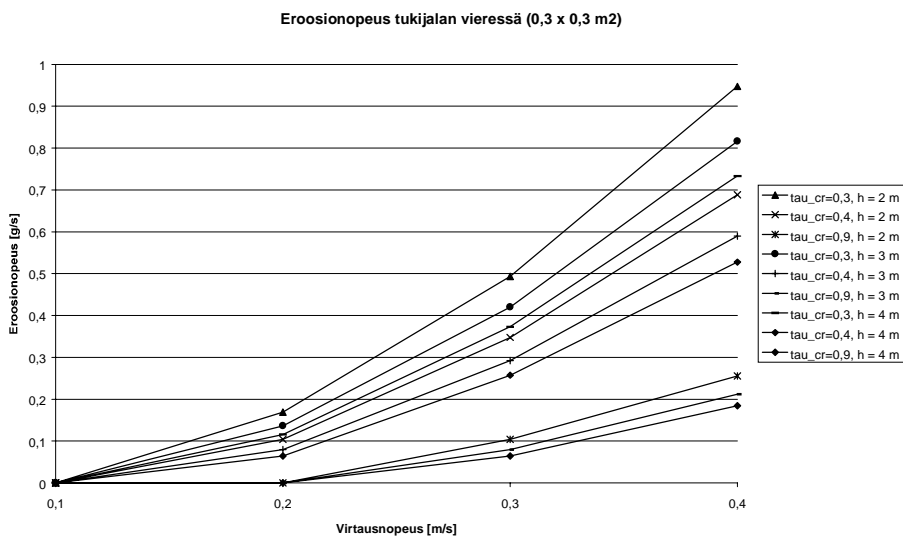
Tukijalan ( $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$ ) eroosionopeus ( $\text{g/m}^2$ ) on laskettu valitulle vaikutusleveydelle (Kuva 86). Eroosion oletetaan tapahtuvan pilarin kummaltakin puolelta noin  $0,18 \text{ m}^2$ :n alueelta ( $2 \times 0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$ ). Kun vallitseva virtausnopeus on 0,1 m/s, eroosiota ei aiheudu. Eroosionopeus on 0,2 m/s virtauksessa noin 0,05–0,15



g/s vesisyvyydestä ja kriittisestä leikkauslujuudesta riippuen. Virtausnopeuden ollessa 0,4 m/s eroosionopeus on 0,2–0,95 g/s. Taulukossa esitetään keskimääräiset eroosionopeuden arvot 1 m<sup>2</sup>:n suuruiselle alueelle (Taulukko 21).



Kuva 84. Padotuksen vaikutusleveyden vaikutus eroosionopeuteen.  $\tau_{cr} = 0,4 \text{ N/m}^2$ , virtausnopeus 0,3 m/s ja tukijalan mitat 0,3 x 0,3 m<sup>2</sup>.



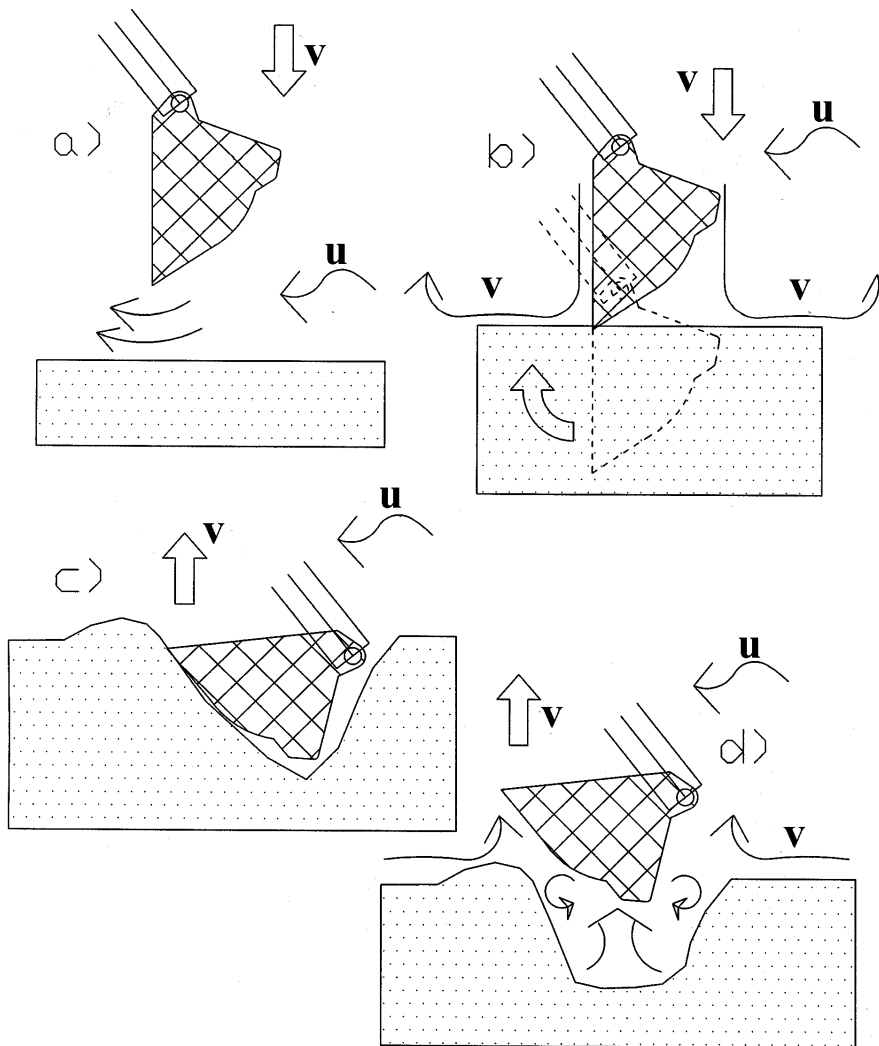
Kuva 86. Eroosionopeus tukijalan (0,3 x 0,3 m<sup>2</sup>) vieressä 0,18 m<sup>2</sup>:n alueelta.

Taulukko 21. Pilarin aiheuttama eroosionopeus  $1 \text{ m}^2$ :n alueelle erilaisilla kriittisen leikkauslujuuden arvoilla.

Virtausnopeus [m/s]	Eroosionopeus ( $\tau_{cr} = 0,3 \text{ N/m}^2$ ) [g/s]	Eroosionopeus ( $\tau_{cr} = 0,4 \text{ N/m}^2$ ) [g/s]	Eroosionopeus ( $\tau_{cr} = 0,9 \text{ N/m}^2$ ) [g/s]
0,1	0,00	0,00	0,00
0,2	0,78	0,46	0,00
0,3	2,38	1,66	0,46
0,4	4,62	3,34	1,21

### 6.3.3 Ruoppaajan vaikutus virtaustilaan

Virtaavassa vedessä kuokkakauhan tai vastaavan ruoppaustyö voidaan esittää karkeasti kuvasarjalla (Kuva 88). Kauhan laskeutuessa virtaus kiihtyy kaivulaitteen alapuolella (Kuva 88a). Esimerkiksi keskimääräisen virtausnopeuden ollessa  $0,1 \text{ m/s}$  ja vesisyvyyden ollessa  $2,0$  metriä virtaa metrin leveydeltä  $200 \text{ l/s}$ . Kauhan laskeutuessa osa tästä virtaamasta menee kauhan ali ja osa kulkee kauhan sivuitse. Kauhan aiheuttama padotus on korkeintaan muutamia senttimetrejä, jota vastaava purkautuminen kauhan ali aiheuttaa maksimissaan noin  $15 \text{ cm/s}$  pohjavirtauksen. Tämän suuruinen virtaus ei aiheuta eroosiota. Varsinaisen kiintoaineksen irtoamisen aiheuttaa laskeutuva kauha, jonka nopeus on arviolta  $0,5 \text{ m/s}$  (laskeutumisaika  $5\text{--}10 \text{ s}$ ). Kauhan ollessa pohjalla (Kuva 88b) virtaustila ja eroosionopeus varren ja kauhan ympärillä vastaavat edellä kuvattua pilarin virtausta. Kauhan painuessa maaperään maa-aines kauhan alapuolella tiivistyy ja reunoilla löyhtyy. Kääntöliikkeen aikana (Kuva 88c) kauha täyttyy ja maa löyhtyy kauhan takana. Kauhaa nostettaessa (Kuva 88d) alapuolelle muodostuu imuvaikutus, joka on verrannollinen nostonopeuteen. Imu yhdessä pyörteiden ja virtauksen kanssa tehostaa maa-aineksen huuhtoutumista ja kiintoaineksen irtoamista. Ruoppausmassojen noston yhteydessä kauhaan tarttunut maa-aines irtoaa noston aiheuttaman ja ympäröivän virtauksen vaikutuksesta. Myös avoimessa kauhassa suojaamattomana olevat massat pääsevät huuhtoutumaan.



Kuva 88. Kuokkakauhan kaivu virtaavassa vedessä. (Ympäröivän virtauskentän virtausnopeus on  $u$  ja kauhan nopeus  $v$ .)

Ruoppauksen suorituksessa ammattitaidolla on erittäin suuri merkitys kiintoaineen irtoamiseen. Tarpeettoman suurella kaivussyvyydellä löyhdytetään pohjan maa-ainesta, jolloin myös irtoavan kiintoaineksen määrä kasvaa. Toisaalta kauhan kaivuvastus suuren vesipitoisuuden omaavassa löyhässä sedimentissä on pieni, mikä vaikuttaa ruoppauksen tarkkuuteen. Lisäksi Kymijoen uitetut pohjaan painuneet tukit saattavat aiheuttaa ikävän yllätyksen kiintoaineen irtoamisen suhteen.

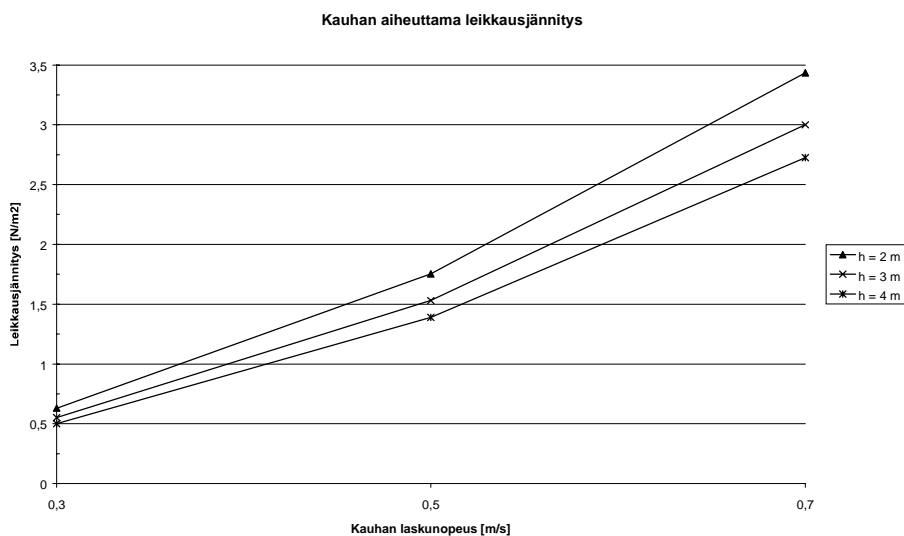
Ruoppaajan aiheuttama kiintoaineen vapautuminen voidaan jakaa seuraaviin osa tarkasteluihin:

- kauhan laskeutumiseen perustuva kiintoaineen irtoaminen
- kauhan ollessa pohjalla edellä esitetyn pilarin eroosiotarkastelun perusteella. Kauhan poikkileikkausala on suurempi kuin varren. Tarkasteluissa oletetaan, että eroosiovaikutus on suhteessa kauhan pohjapinta-alaan. Poikkeuksen muodostaa pumppukauha, jota siirrellään pohjalla ja jolla ruoppausmassat pumpataan ylös. Kauhan liikuttelun vaikutusta virtauksiin ja eroosionopeuteen on vaikea arvioida teoreettisen tarkastelun perusteella. Tässä tarkastelussa oletetaan, että kauhan liikuttelu kaksinkertaistaa pilarin aiheuttaman eroosionopeuden (tekijän vaikutusta kokonaiskiintoaineen määrään arvioidaan myös 1,5- ja 2,5-kertaisilla eroosionopeuksilla).
- kauhan nostosta aiheutuva kiintoaineen irtoaminen uoman pohjasta.
- avoimesta kauhasta tapahtuva ruoppausmassojen karkaaminen.

### **Kauhan liikenopeuteen perustuva eroosio**

Kauha syrjäyttää vettä sitä laskettaessa tai nostettaessa. Syrjäytyvä vesimäärän suuruus on poikkipinta-ala kerrottuna kauhan liikenopeudella. Tämä virtaus kohtaa pohjan pystysuunnassa, ja kauhan tunkeutuessa pohjaan se kääntyy pohjan suuntaiseksi. Pohjalla vaikutus ulottuu karkeasti arvioiden noin 0,5 metrin levyiselle alueelle (likimain kauhan korkeus), jonka jälkeen virtaus nousee ylöspäin muodostaen pyörteen. Kauhaa nostettaessa ilmiö toistuu päinvastaisena ja virtausvaikutus on myös kauhan alapuolella. Kauhan laskun ja noston aiheuttaman pohjaa syövyttävän virtauksen oletetaan kestävän viisi (5) sekuntia.

Pohjan eroosionopeus arvioidaan kauhan liikenopeuden perusteella. Pohjalla vaikuttava virtausnopeus on liikenopeuden suuruinen. Kuvassa esitetetään kauhan pohjaan aiheuttama leikkausjännitys erilaisilla kauhan nopeuden arvoilla (Kuva 90). Kun kauhan nopeus on 0,5 m/s, aiheutuu pohjaan noin 1,4–1,75 N/m<sup>2</sup>:n suuruinen leikkausjännitys. Taulukossa esitetään kauhan laskun ja noston aiheuttama eroosio 1 m<sup>2</sup>:n alueelle erilaisilla kauhan liikenopeuksilla (Taulukko 23).



*Kuva 90. Kauhan laskun tai noston pohjaan aiheuttama leikkausjännitys ( $N/m^2$ ) erilaisilla kauhan nopeuksilla.*

*Taulukko 23. Kauhan ja laskun noston aiheuttama eroosionopeus  $1\text{ m}^2:n$  alueelle erilaisilla kauhan nopeuksilla.*

<b>Kauhan nopeus</b> [m/s]	<b>Eroosionopeus</b> ( $\tau_{cr} = 0,3\text{ N/m}^2$ ) [g/s]	<b>Eroosionopeus</b> ( $\tau_{cr} = 0,4\text{ N/m}^2$ ) [g/s]	<b>Eroosionopeus</b> ( $\tau_{cr} = 0,9\text{ N/m}^2$ ) [g/s]
0,3	0,43	0,20	0,00
0,5	2,10	1,45	0,37
0,7	4,59	3,32	1,20

### **Avoimesta kauhasta tapahtuva kiintoaineksen karkaaminen**

Avointa kauhaa nostettaessa osa ruopatusta maa-aineksesta pääsee valumaan pois, ja edelleen nostettaessa kauhan pinnalla vaikuttaa kauhan nopeutta vastaava leikkausjännitystila. Lisäksi alaslaskettaessa vesi huuhtelee tyhjennyksen jälkeen kauhaan jääneen maa-aineksen. Avoimen kauhan vedessä liikuttelun

aikana eroosionopeuden oletetaan olevan 1,5-kertainen pohjalla tapahtuvaan verrattuna.

### 6.3.4 Ruoppaajien vertailu

Edellä esitetyn tarkastelun pohjalta vertaillaan avoimen ja suljetun kuokkakauhan, pumppukauhan ja suljetun kahmarikauhan ruoppaustyössä vapautuvaa kiintoaineen määrää. Taulukossa esitetään työkierron pituus ja sen kuluessa ruopattu teoreettinen massamäärä sekä ruoppausteho (Taulukko 25). Pumppukauhalla työkierron aikana ruopattu massa arvioitiin Vesimestarin ulottuman (Kuva 65) ja kaivusyvyyden perusteella.

*Taulukko 25. Kenttäkokeessa vertailtavien ruoppaajien työkierron aikana ruopatut massat ja kulunut aika sekä ruoppausteho.*

	<b>Ruoppausmassat [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Aika [s]</b>	<b>Ruoppausteho [m<sup>3</sup>]</b>
Avoin kuokkakauha	0,7	29	87
Suljettu kuokkakauha	0,7	39	65
Pumppukauha	6,3	72	315
Suljettu kahmarikauha	2,8	48	210

Liitteessä 1 esitetään laskentojen tulokset kolmella kauhan nopeudella (0,3 m/s, 0,5 m/s ja 0,7 m/s). Taulukko 15 esittää avoimen kuokkakauhan ruoppaustyön aikana vapautunutta kiintoainemäärää. Kauhan nopeudella on suuri vaikutus vapautuvan kiintoaineksen määrään. Esim. kauhan nopeuden kasvaessa 0,3 m:stä/s 0,5 m:iin/s irtoavan kiintoaineksen määrä lisääntyy 3–4-kertaiseksi. Eroosio ruopattua m<sup>3</sup>:ä kohti on maksimissaan lähes 650 g/m<sup>3</sup>.

Taulukko 27. Avoimen kuokkakauhan työkierron aikana vapautunut kiintoaines.

Kauhan nopeus [m/s]	Virtausnopeus [m/s]	Eroosio (0,3 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Eroosio (0,4 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Eroosio (0,9 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Kiintoaine max [g/s]	Kiintoaine max [g/m <sup>3</sup> ]
0,3	0,1	36,86	17,14	0	1,27	59,69
	0,2	47,74	23,56	0	1,65	70,04
	0,4	101,31	63,74	16,88	3,49	144,73
0,5	0,1	180,00	124,29	31,74	6,21	257,14
	0,2	190,88	130,70	31,71	6,58	272,69
	0,4	244,45	170,88	48,59	8,43	349,21
0,7	0,1	393,43	284,57	102,86	13,57	562,04
	0,2	404,31	290,99	102,86	13,94	577,59
	0,4	457,88	331,17	119,74	15,79	654,11

Taulukoissa 16–18 esitetään vastaavat arvot suljetulle kuokkakauhalle, pumppukauhalle ja suljetulle kahmarikauhalle. Avoimella kuokkakauhalla vapautuu noin 1,1–1,3 kertaa suurempi kiintoainemäärä kuin suljetulla kuokkakauhalla. Kahmarikauhasta ja suljetusta kuokkakauhasta vapautuu likimain samansuuruinen kiintoainemäärä (g/s). Pienillä virtausnopeuksilla (0,1 m/s) pumppukauhan liikuttelulla ei ole vaikutusta eroosion suuruuteen (Kuva 92). Virtausnopeuden ollessa 0,2 m/s noin kolmasosa eroosiosta aiheutuu liikuttelusta, ja virtausnopeuden ollessa 0,4 m/s sen osuus on jo 80 %.

Taulukko 28. Suljetun kuokkakauhan työkierron aikana vapautunut kiintoaines.

Kauhan nopeus [m/s]	Virtausnopeus [m/s]	Eroosio (0,3 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Eroosio (0,4 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Eroosio (0,9 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Kiintoaine max [g/s]	Kiintoaine max [g/m <sup>3</sup> ]
0,3	0,1	28,66	13,33	0	0,73	40,94
	0,2	39,54	19,75	0	1,01	56,49
	0,4	93,11	59,92	16,88	2,39	133,01
0,5	0,1	139,97	96,64	24,66	3,59	199,96
	0,2	150,85	103,06	24,66	3,87	215,50
	0,4	204,41	143,24	41,54	5,24	292,01
0,7	0,1	305,92	221,28	79,98	7,84	437,03
	0,2	316,80	227,70	79,98	8,12	452,57
	0,4	370,37	267,87	96,86	9,50	529,10

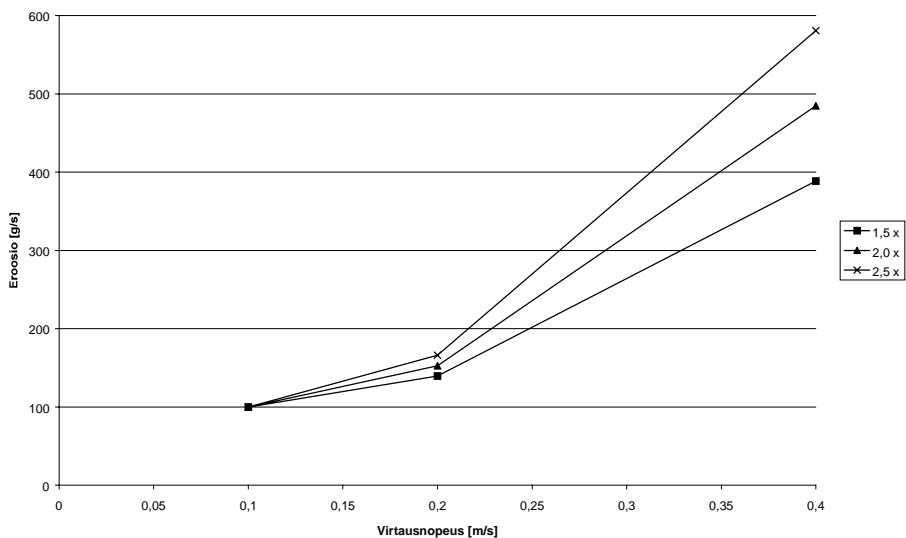
Taulukko 29. Pumppukauhan työkierron aikana vapautunut kiintoaines.

Kauhan nopeus [m/s]	Virtausnopeus [m/s]	Eroosio (0,3 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Eroosio (0,4 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Eroosio (0,9 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Kiintoaine max [g/s]	Kiintoaine max [g/m <sup>3</sup> ]
0,3	0,1	29,58	13,76	0	0,41	4,70
	0,2	119,44	66,75	0	1,66	18,96
	0,4	561,81	398,53	139,39	7,80	89,18
0,5	0,1	144,48	99,76	25,46	2,01	22,93
	0,2	234,34	152,75	25,46	3,25	37,20
	0,4	676,7	484,53	164,85	9,40	107,41
0,7	0,1	315,79	228,42	82,56	4,39	50,13
	0,2	405,65	281,41	82,56	5,63	64,39
	0,4	848,02	613,18	221,95	11,78	134,61



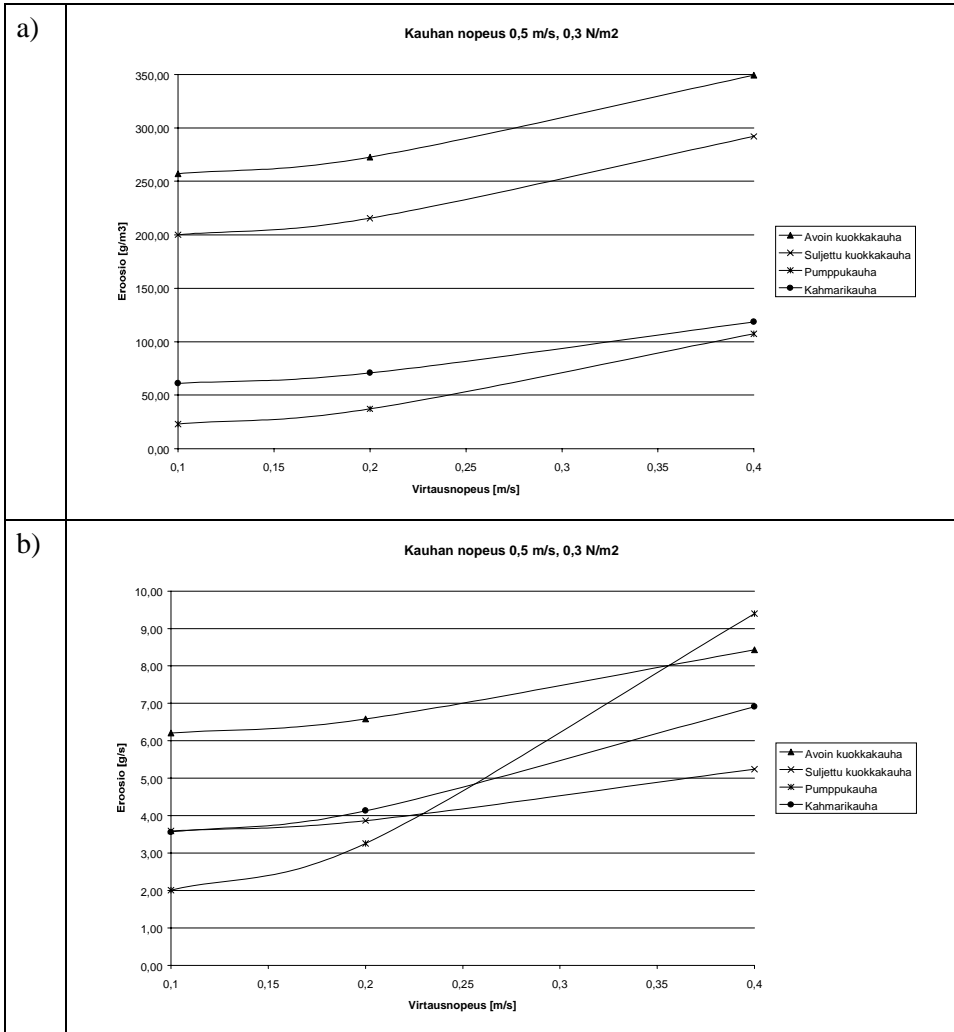
Taulukko 30. Kahmarikauhan työkierron aikana vapautunut kiintoaines.

Kauhan nopeus [m/s]	Virtausnopeus [m/s]	Eroosio (0,3 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Eroosio (0,4 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Eroosio (0,9 N/m <sup>2</sup> ) [g]	Kiintoaine max [g/s]	Kiintoaine max [g/m <sup>3</sup> ]
0,3	0,1	35,00	16,28	0	0,73	12,50
	0,2	62,13	32,28	0	1,29	22,19
	0,4	195,70	132,46	42,09	4,08	69,89
0,5	0,1	170,92	118,02	30,12	3,56	61,04
	0,2	198,05	134,02	30,12	4,13	70,73
	0,4	331,63	234,20	72,20	6,91	118,44
0,7	0,1	373,59	270,22	97,67	7,78	133,43
	0,2	400,72	286,22	97,67	8,35	143,11
	0,4	534,29	386,4	139,76	11,13	190,82



Kuva 92. Pumppukauhan liikuttelun vaikutus eroosioon ( $\tau_{cr} = 0,4 \text{ N/m}^2$  ja kauhan nopeus 0,5 m/s). Laskelmissa pohjalla olevan ruoppaajan aiheuttama pilarivaikutus on 1,5–2,5-kertainen normaaliin verrattuna.

Vertailtaessa kiintoainemäärää ruopattua  $m^3$ :ä kohti voidaan todeta, että pump- pu- ja kahmarikauhalla saadaan pienimmät vapautuneet kiintoainemäärät (Kuva 94). Virtaus alkaa vaikuttaa irtoavan kiintoaineksen määrään nopeuden ollessa suurempi kuin 0,2 m/s. Virtausnopeuden arvon muuttuessa 0,2 m:stä/s 0,4 m:iin/s, kasvaa irtoavan kiintoaineksen määrä 1,3–2,9-kertaiseksi. Muutos on suurin pumppukauhalla, joka työskentelee pitkiä aikoja pohjalla.



Kuva 94. Ruoppaajien vertailu. Ruoppaustyössä irtoavan kiintoaineksen määrä a) ruopattua  $m^3$ :ä kohti ja b) aikayksikköä kohti. Kauhan nopeus on 0,5 m/s ja  $\tau_{cr} = 0,3 N/m^2$ .

Ruoppauksen aiheuttama kiintoaineen lisäys välittömästi ruoppaajan takana voidaan laskea ohikulkevan virtaaman perusteella (Taulukko 31). Teoreettisen tarkastelun perusteella lasketut vapautuvat kiintoainepitoisuudet ovat pienempiä kuin kirjallisuudessa esitetyt. Tarkastelun perusteella voidaan kuitenkin päätellä ruoppausmenetelmien keskinäinen paremmuus.

*Taulukko 31. Ruoppauksen aiheuttama virtauksen kiintoainepitoisuuden lisäys. Vesisyvyys 2,0 m, virtausnopeus 0,1 m/s ja sekoittumisleveys 1,6 m. Kauhan nopeus on 0,7 m/s ja kiintoaineen määrät ovat keskimääräisiä.*

	<b>Kiintoaine</b>	<b>Sekoittunut koko syvyydeltä</b>	<b>Sekoittunut pohjavirtaukseen (0,5 m)</b>
	<b>[g/s]</b>	<b>[mg/l]</b>	<b>[mg/l]</b>
Avoin kuokkakauha	14,43	45,1	180,4
Suljettu kuokkakauha	8,49	26,5	106,0
Pumppukauha	7,27	22,7	90,9
Kahmarikauha	9,09	28,4	113,6

Irtoavaan kiintoainemäärään vaikuttaa ruoppaustyön tarkkuus. Esimerkiksi kuokkakauhan teoreettinen pohjapinta-ala on  $0,93 \text{ m}^2$ . Tällöin 5 cm:n ylikaiivulla liikutetaan noin 45 l:n tilavuudelta maamassaa. Jos 5 % tästä tilavuudesta liettyy, saadaan Kymijoen sedimenttinäytteiden keskimääräisen kuiva-ainepitoisuuden (26 %) ja massan tiheyden ( $2\,600 \text{ kg/m}^3$ ) perusteella noin 1,5 kg irtoavaa kiintoainesta. Tällöin kuokkakauhan ylikaiivusta johtuva kiintoainemäärän lisäys on ruoppaajan kiertoaajasta (29–39 s) riippuen 40–50 g/s, joka pelkästään on 4–5-kertainen teoreettisesti laskettuihin verrattuna.

Taulukossa 20 esitetään arvio Kuusankosken ja Keltin välillä olevien saastuneiden sedimenttien ruoppauksessa ( $140\,000 \text{ m}^3$ ) irtoavasta kiintoainemäärästä (Taulukko 33). Taulukon laskelmissa on oletettu, että ruoppauskohteessa keskimääräinen virtausnopeus on 0,2 m/s ja kauhan nopeus on 0,5 m/s. Pumppukauhaa ja suljettua kahmarikauhaa käyttäen liettyy noin 5–10 tonnia kiintoainetta,

suljettua kuokkakauhaa käyttäen kiintoainemäärä on noin 30 tonnia ja avointa kuokkakauhaa käyttäen noin 40 tonnia. Yliruoppauksesta johtuen kiintoainemäärät voivat olla moninkertaiset.

*Taulukko 33. Arvioitu Kuusankosken ja Keltin välisen alueen ruoppaustyössä (140 000 m<sup>3</sup>) irtoavan kiintoaineksen määrästä.*

	Irtoava kiintoaine [g/m <sup>3</sup> ]	Irtoavan kiintoaineen kokonaismäärä [kg]
Avoin kuokkakauha	273	38 220
Suljettu kuokkakauha	216	30 240
Pumppukauha	37	5 180
Kahmarikauha	71	9 940

Dioksiini- ja furaaniyhdisteiden pitoisuus Kuusankosken ja Keltin välissä on noin 73 µg/g, jolloin ruoppaustyön aikana irtoava sedimentti sisältää noin 0,4–2,8 kg dioksiinia ja furaania ruoppaustavasta riippuen. Kuusankosken ja Keltin väliltä otettujen elohopeanäytteiden keskimääräinen pitoisuus oli 7 mg/kg, jolloin ruoppaustyössä vapautuisi noin 40–270 g.

### 6.3.5 Muut ruoppaajat

Hoppereiden ylijuoksutus aiheuttaa noin 2–10 % kiintoainepitoisuuden. Tämän vuoksi ylijuoksutusta ei suositella saastuneita sedimenttejä ruopatessa. Leikkuri-imuruoppaajien ja hoppereiden aiheuttama kiintoainepitoisuus seisovassa vedessä on noin 200 mg/l. Leikkuri-imuruoppaajan aiheuttama kiintoainepitoisuus virtaavassa vedessä oli noin 250 mg/l (Savannah-joki, virtausnopeus <0,8 m/s).

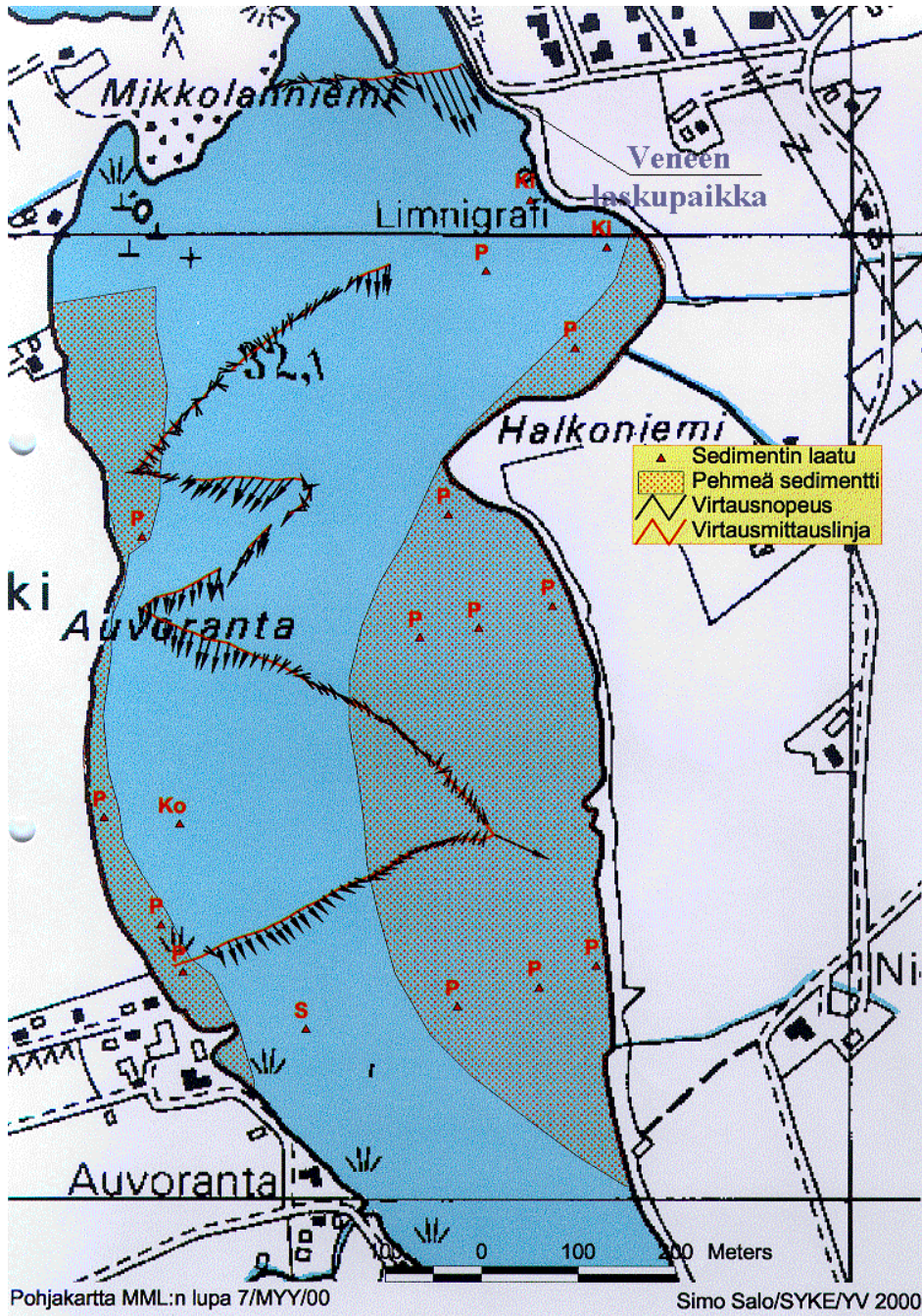
Erikoisruoppaajien aiheuttama kiintoainepitoisuus on alle 10 mg/l (Clean up 1–7 mg/l, Oozer 6 mg/l). Pneumaattisten ruoppaajien haittapuolena on suuri ruoppausvyvyys.

Mud Cat -ruoppaajaa on käytetty jokiolosuhteissa Welland-joella, ja todettu keskimääräinen kiintoainepitoisuus ruoppaajan takana oli noin 50 mg/l. Lisäksi levyleikkuriruoppaaja vaikuttaa käyttökelpoiselta Kymijoen olosuhteissa.

## 6.4 Kenttäkoesuunnitelma

Tässä kohdassa esitetään näkökohtia varsinaisen kenttäkoesuunnitelman tekemiselle.

Myllykosken alapuolelle tehtiin maastokäynti 6.4.2000 kenttäkokeiden suorittamista varten. Maastokäynnille osallistuivat Erkki Mykkänen, Matti Verta ja Olli Malve SYKEstä, Lasse Rajala Kaakkois-Suomen ympäristökeskuksesta sekä Juha Laasonen VTT Valmistustekniikasta. Kaakkois-Suomen ympäristökeskuksen veneellä tutustuttiin alueen pehmeikköihin (Kuva 96). Veneen laskupaikka sijaitsee Kymijoen itärannalla. Vesisyvyyydet uoman keskellä ovat noin 7–9 m. Laajin pehmeän sedimentin alue on uoman itärannalla Halkoniemen eteläpuolella. Pehmeiköllä vesisyvyys on noin 1–3 m. Lisäksi oli nähtävissä irtouiton aikaisia johteiden tukia. Toinen kenttäkokeeseen soveltuva paikka on Halkoniemen pohjoispuolella limnigrafien eteläpuolella. Saman maastokäynnin yhteydessä käytiin tutustumassa Kuusankosken alapuolella oleviin pehmeikköihin.



Kuva 96. Pehmeän sedimentin alueet Myllykosken alapuoella sekä virtausnuolikuviot noin 180 m<sup>3</sup>/s virtaamalla (mittaus) (Suomen ympäristökeskus).

Taulukko 35. Suspendoituneen sedimentin mittaamenetelmät (Wren et al., 2000).

Menetelmä	Käyttöperiaate	Edut	Haitat
Akustinen	Äänen takaisinsirontaluotaukseen perustuva menetelmä. Sedimentin kokojakautuma ja konsentraatio.	Hyvä erotuskyky ajan ja paikan suhteen mittaa laajalta korkeusalueelta. Virtaus ei häiritse mittausta.	Takaisin heijastunut akustinen signaali on vaikea tulkita. Signaali heikentyy suurissa konsentraatiopitoisuuksissa.
Näytteenotto (pullo tai pumpaus)	Vesi-sedimenttinäyte otetaan upottamalla astia virtaukseen tai pumpaamalla. Näyte analysoidaan myöhemmin.	Hyväksytty aikatestattu tekniikka, voidaan määrittää konsentraatio ja kokojakautuma. Useimmat menetelmät on kalibroitu astiänäytteenoton perusteella.	Paikallinen näyte. Laboratorioanalyysi. Virtaus häiritsee näytteenottoa.
Suunnatun suihkun heijastus	Lasersuihkun heijastumisajan mittaus sedimentistä.	Partikkelin koosta riippumaton. Laaja konsentraation ja partikkelikoon mitausalue.	Kallis, virtaus vaikuttaa, ainoastaan pistemittaus.
Laserdiffraktio	Lasersuihkun refraktiokulman mittaus sedimentistä.	Partikkelin koosta riippumaton.	Epäluotettava, kallis, virtaus vaikuttaa, pistemittaus, rajoitettu partikkelikoko.
Radioaktiivinen	Gamma tai röntgensäteiden takaisinsironta tai läpäisevyyden mittaus vesisedimenttinäytteestä.	Alhainen tehon kulutus, laaja konsentraation ja partikkelin koon mitausalue.	Alhainen herkkyys, radioaktiivinen lähde, säännökset, virtaus vaikuttaa, pistemittaus.
Optinen	Infrapunavalon takaisinsironta tai läpäisevyys.	Yksinkertainen, hyvä tarkkuus paikan suhteen, kaukokäyttömahdollisuus.	Riippuu voimakkaasti partikkelikoosta, virtaus vaikuttaa, pistemittaus, näyttövirheitä.
Kauko-ohjattu spektriheijastus	Valon heijastuminen ja sironta mitataan vesimassasta.	Laajojen alueiden mittaushetimitä.	Huono erotuskyky, soveltuu huonosti jokiympäristöön partikkelin koosta riippuva.



Suspendoituneen sedimentin kokojakautuman on havaittu olevan erilainen in situ -mittauksissa (todellinen partikkelien kokojakautuma) kuin laboratoriossa määritetyssä (absoluuttinen partikkelien kokojakautuma). Tämä johtuu siitä, että vedessä hienoainekseen muodostuu flokkeja. Luonnontilaisen partikkelijakautuman oletetaan olevan tasapainossa virtauksen turbulenssin kanssa. Tällöin esim. vesinäytettä otettaessa muutetaan tasapainotilaa, jolloin mahdollisesti partikkelien väliset sidokset rikkoutuvat (Phillips & Walling 1995).

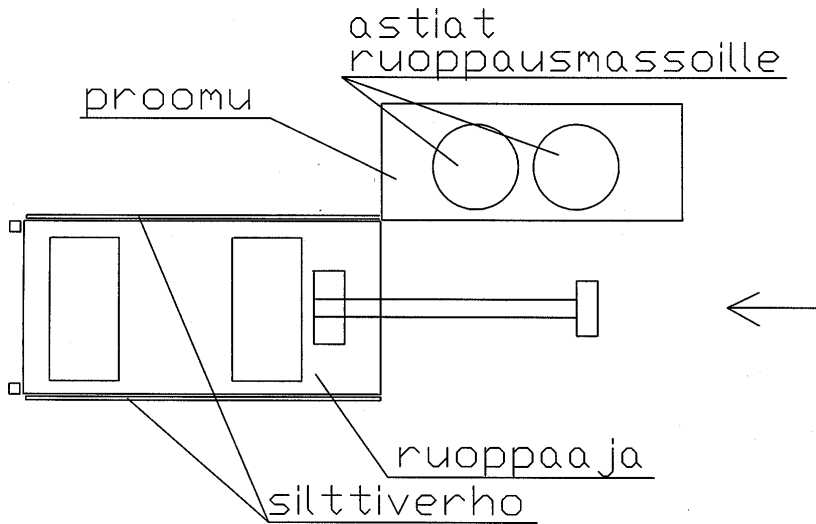
Taulukossa esitetään suspendoituneen sedimentin mittaamenetelmät (Taulukko 35) (Wren et al., 2000).

Koheesiomaalajien in situ -leikkauslujuus voidaan mitata CSM-laitteella (Cohesive Strength Meter), joka perustuu pystysuuntaisten virtaussuihkujen aiheuttamaan eroosiojännitykseen ja irtoavan kiintoaineksen aiheuttaman valon läpäisevyyden pienenemiseen (Tolhurst et al., 1999). Sedimentin syvempien kerroksien leikkauslujuus voidaan määrittää siipikairauksella.

Kenttäkokeessa kullakin kauhalla ruopataan  $20 \text{ m}^3$ . Ruoppaajan ulottuvuuden perusteella voidaan yhdestä kohdasta ruopata noin puolet tästä määrästä, joten kauhan vaikutuksia irtoavaan kiintoainekseen voidaan tutkia kahdessa eri tapauksessa. Teoreettisen tarkastelun perusteella kauhan laskunopeudella on merkittävä vaikutus irtoavaan kiintoainekseen. Tämän vuoksi ruoppaus suoritetaan kullakin laitteella kahdella kauhan nopeudella (0,4 ja 0,7 m/s). Kenttäkoe suoritetaan Myllykosken alapuolella olevalla laajalla sedimentaatioalueella. Ruoppaus on pyrittävä suorittamaan kaikilla laitteilla noin 2–2,5 m:n vesisyvytydeltä. Ruoppauskohteen virtaukset määritetään etukäteen (ADCP) ja suositeltava ruoppauskohteen virtausnopeusalue on (0,05) 0,1–0,3 m/s.

Ruoppaaja sijoitetaan virtauksen suuntaisesti ja sen sivuille asennetaan silttiverhot virtauksen ohjaamiseksi takana tapahtuvaan mittauskohtaan (Kuva 98). Ruoppaajan takana mitataan virtausnopeutta ja sameutta sekä otetaan vesinäytteitä. Koeruoppaus on lyhytaikainen tapahtuma, joten sedimenttitrappien käyttöä ei esitetä käytettäväksi. Ruoppausmassat nostetaan ruoppaajan vieressä oleviin teräsastioihin. Ruoppausmassat kuljetetaan läjitysalueelle edelleen käsiteltäviksi. Taulukossa esitetään kenttäkokeen aikana mitattavia suureita ja niiden mittaamenetelmiä (Taulukko 36).





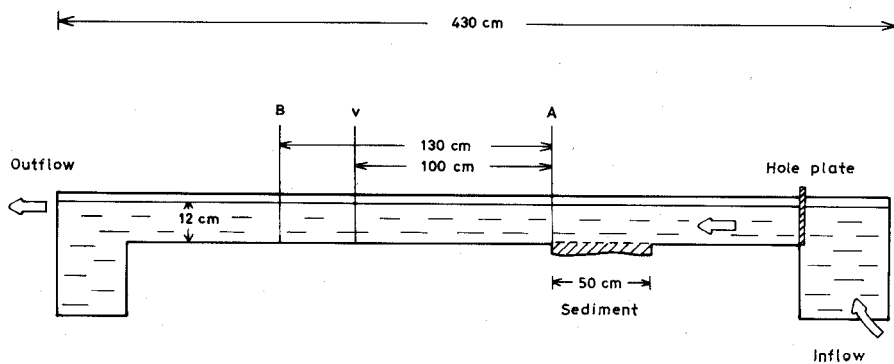
Kuva 98. Ehdotus kenttäkokeiden järjestelyistä.

Taulukko 36. Kenttäkokeessa mitattavat suureet ja menetelmät.

Mitattava suure	Laite	Ajankohta
Sijainti	Ruoppauskohde, GPS	
Virtaama	Tiedot voimalaitoksilta	
Vedenkorkeudet	Tiedot voimalaitoksilta	
Vesisyvyydet	Ruoppauspaikalla noin 2 m	Paikat määritetään valmistelujen yhteydessä.
Virtausnopeudet	ADCP	Ruoppauskohteen tiedot ennen ruoppausta ja mittaus ruoppaustyön aikana.
Sameus	Jatkuvatoiminen	Ennen ruoppauksen aloittamista, ruoppauksen aikana sekä jälkeen.
Vesinäytteet	4–5 kpl/työvuoro	Ennen ruoppaustyötä (tausta-arvo) ja ruoppaustyön aikana.
Maanäytteet	Häiriintymättömät kpl Ruoppausmassat kpl/laite	Raekoko, haihdutus-hehkutushäviö, myrkkypitoisuudet (Hg.)
Leikkauslujuus	CSM siipikaira	Häiriintymätön.

## 6.5 Mallikoesuunnitelma

Huttula et al. (1990) ovat suorittaneet Valkeakosken kuitupitoisella sedimentillä virtauskokeita eroosioherkkyyden määrittämiseksi (Kuva 100). Pleksistä rakennetussa virtauskourussa tutkittiin virtausnopeusalueita 2–18 cm/s. Virtausnopeudet mitattiin siivikolla. Pisteissä A ja B otettiin vesinäytteitä (100 ml). Virtauskourussa mitattiin sameus ja kiintoainepitoisuus. Mittausten perusteella sameuden ja kiintoainepitoisuuden välille ei löydetty selvää yhteyttä.



Kuva 100. Selluloosan eroosion tutkimiseen käytetty virtauskouru (Huttula & Krogerus, 1986).

Kuitupitoisella sedimentillä tehtyjen eroosiokeiden perusteella saatiin kriittiseksi leikkauslujuuden arvoksi  $0,008 \text{ N/m}^2$ , jota vastaava virtausnopeuden arvo on noin 3,5 cm/s.

Kymijoen sedimentillä suunniteltiin alun pitäen tehtäväksi samanlaisia kokeita, mutta Valkeakosken tutkimustuloksia yhdessä edellä esitettyjen kirjallisuudesta löytyneiden leikkauslujuuden arvoja käyttäen voidaan arvioida numeerisen mallitarkastelun virhettä. Jos lisäksi kenttäkokeiden yhteydessä voidaan mitata in situ -leikkauslujuus, on samankaltaisten mallikokeiden suorittaminen tarpeellonta.

Tässä selvityksessä käytettiin eroosionopeuden yhtälönä USACE:n mudalle määritettyä yhtälöä (8). Eroosionopeuteen vaikuttavat merkittävästi paikalliset olosuhteet (tiiviys, koheesio, vesi- ja kuitupitoisuus, veden lämpötila jne). Tar-

kastelluissa eroosioyhtälöissä määritettävänä tekijänä oli kriittinen leikkausluku. Yhtälöt olivat lineaarisia, joten Kymijoen sedimentillä tehdyillä kokeilla voidaan määrittää yhtälön tarkempi kulmakerroin. Numeerisissa virtaus- ja sedimentin kulkeutumislaskelmissa tämä voidaan tehdä myös herkkyystarkastelun avulla.

Tukijalkojen ja kauhan liikkeiden aiheuttamaa eroosiota on arvioitu virtaustekniikan yhtälöiden avulla. Määritettyihin arvoihin saadaan lisäselvyyttä tuulitunnelissa tehtävillä tukijalan ja kauhan virtauskentän muutostutkimuksilla.

## **7. Toimintamallien vaikutusten arviointia**

### **7.1 Kymijoen pienet paikallisruoppaukset (esim. laiturit, uimapaikat)**

Kaakkois-Suomen ympäristökeskus (2000) on tehnyt toimintaohjeet Kymijoen pienille ruoppauksille. Ohjeiden mukaan pienissä ruoppauksissa selvitetään ruopattavien sedimenttien saastuneisuus näytteen (tai näytteiden) perusteella. Ruoppaus ja ruoppausmassan käsittely vaativat ympäristöluvan, jos dioksiinipitoisuus on suurempi kuin 500 pg/g ITEQ tai elohopeapitoisuus suurempi kuin 5 mg/kg.

Ruoppaustyössä irtoavan kiintoaineksen määrään vaikuttavat käytettävä ruoppausmenetelmä, ammattitaito ja ruoppauskohteen virtausolosuhteet. Näistä merkittävin liettymisen aiheuttaja on ammattitaitoon liittyvä liian suuri ruoppausvyvyys. Hitaasti virtaavilla alueilla voidaan käyttää siltiverhoja estämään kiintoaineen leviäminen. Tämän selvityksen perusteella suljetulla kahmari-kauhalla ja pumppukauhalla vapautuu vähiten kiintoainetta ruopattua massamäärää kohti. Kauhuruoppaajien kenttäkokeesta saadaan lisätietoa eri ruoppaajien aiheuttamasta liettymisestä.

### **7.2 Tulvien, talviaikaisten hyytöjen ja jääpatojen vaikutukset**

Kymijoen tulvavirtaamat (MHQ) ovat noin puolitoista kertaa suurempia kuin joen keskivirtaama. Virtaaman lisäyksen seurauksena myös uoman virtausnopeudet kasvavat. Tulvia juoksutetaan myös säännöstelypadon kautta, mikä vaikuttaa virtausnopeusjakautumaan voimalaitospadon alapuolella. Voimalaitoksen koneistojen revisiot ja käyttöhäiriöiden aiheuttamat seisokit lisäävät ohijuoksutuksia. Suurilla virtaamilla ja tulva-aukkojen juoksutuksilla muutetaan alapuolista virtausnopeuskenttää ja sedimentaatioalueet voivat muuttua eroosio-alueiksi.

Kuusankosken ja Keltin välisellä jokiosuudella sijaitsevat pahiten saastuneet alueet. Haitallisten aineiden pitoisuuksia on tavattu myös Kymijoen alaosalla. Kuusankosken alapuolella saastuneiden sedimenttien liikkeelle lähtöön vaikutta-

vat olennaisesti tulva-aukkojen kautta tapahtuvat juoksutukset. Eroosion laajuuden ja vaikutusten selvittäminen edellyttää hydrologisia ja numeerisia virtaus- ja kulkeutumislaskelmia, joissa otetaan huomioon turpiinien käyttöhäiriöt.

Kymijoella jääpatoja muodostuu uoman alaosalla (Anjalankosken alapuolella) vapaana virtaavien koskien alueella. Koskien alapuolelle muodostuvat suvanne-jääpadot syövyttävät uoman pohjaa syventäen sitä, jolloin näistä kohdista saattaa muodostua sulan veden aikaan sedimentaatioalueita. Kymijoen sedimentin alhaisen laskeutumismopeuden perusteella sedimentaatio saattaa näissä kohdissa olla vähäistä. Tutkimustulosten perusteella haitallisten aineiden pitoisuudet pienenevät Kymijoen alaosalla. Tämän vuoksi talviaikaisilla hyydöillä ja jääpadoilla on vähäinen merkitys saastuneiden sedimenttien liikkeellelähtöön.

### **7.3 Kymijoen kanavointi**

VTT Valmistustekniikka (2000) on tarkastellut ympärivuotisen liikennöinnin mahdollisuutta Saimaan kanavassa ja suunnitellussa Kymijoen ja Mäntyharjun kanavaparissa. Selvityksen mukaan ympärivuotisen liikennöintiin tarvitaan 1 A super -laivan konetehto, joka on 3 200 kW. Näillä tehoilla laivan paaluveto olisi syvässä vedessä noin 450 kN. Tämä teho on käytössä aluksen kulkiessa raskaassa jääsohjossa. Tällöin aluksen ollessa varustettuna kahdella potkurilla virtausnopeus on potkurin luona noin 8,3 m/s ja noin 30 m:in päässä potkurista yli 5 m/s. Potkurin virtauksien aiheuttamat eroosio on huomattavasti suurempi kuin esimerkiksi tulvajuoksutusten aiheuttama.

Kymijoen kanavan alustavan yleissuunnitelman (Merenkululaitos, 2000) mukaan kanavalinja kulkee Kuusankosken kohdalla tehdasalueen läpi voimalaitoksen ja säännöstelypadon eteläpuolelta. Linjaus kulkee pahiten saastuneiden alueiden läpi.

Jos Kymijoen kanava päätetään rakentaa, aluksen potkurivirtaukset ja takaisin-virtaukset aiheuttavat voimakasta eroosiota sedimentaatioalueilla. Vaihtoehtoina tulevat kysymykseen saastuneiden alueiden peittäminen tai ruoppaus. Vaihtoehtoa valittaessa on verrattava peittämisen ja ruoppauksen aikana liettyvä kiintoainemäärä. Pehmeiköille veteen tehtävä peittotyö on hankala ja työvaltainen. Peittämisen jälkeen suojaus saattaa potkurivirtausten tai jään vaikutuksesta

rikkoontua ja kiintoaineen eroosiota saattaa tapahtua suodatinkankaiden saumoista. Tämän perusteella Kymijoen kanavointiin liittyvä peittäminen sisältää useita epävarmuustekijöitä, jotka puoltavat ruoppaustyön suorittamista.

## 7.4 Ruoppausajankohdan valinta

Jos Kymijoella päädytään laajamittaiseen saastuneiden maa-alueiden ruoppaamiseen, työn ajankohta on valittava siten, että vaikutukset ovat mahdollisimán vähäiset. Ajankohdan valintaan vaikuttavat mm. Kymijoen virtaama, virkistyskäyttö ja saastuneiden sedimenttien käyttäytyminen eri vuoden aikoina.

Kymijoen virtaama määräytyy Pyhäjärven vedenkorkeuden perusteella, eikä juoksutuksiin voida helposti vaikuttaa. Suurimmat virtaamat ovat yleensä kevättulvan aikaan. Syksyllä on sateista johtuen syystulva. Pienillä virtaamilla virtausnopeudet ovat myös pienempiä ja eroosio on vähäisempää. Suurten virtaamien aikana kiintoaines laimenee suurempaan vesimassaan.

Kymijoella virkistyskäyttöä on keväästä myöhäiseen syksyyn. Kymijoen itäinen haara on kuuluisa lohikalojen kalastuspaikka. Taimenen ja lohen pääosan nousuvaellus alkaa heinäkuussa ja jatkuu syksyyn. Siika nousee lokakuussa veden lämpötilan ollessa noin +5 °C. Ruoppaustyö on mahdollista aloittaa siian nousun jälkeen. Kalan nousuvaellus pysähtyy alaosan padoille, eikä alueella ole laajoja poikastuotantoalueita. Pyhäjärvi jäätyy keskimäärin joulukuun alkupuolell, ja Kymijokeen muodostuu aluksi reunajäätä, joten ruoppaukseen on käytettävissä noin 1,5 kuukautta.

Metyylielohopean määrä lisääntyy huomattavasti lämpötilan noustessa. Kesällä metyylielohopean maksimipitoisuudet ovat pinnassa ja talvella ne ovat syvemällä.

Lämpötilan laskiessa mudan eroosionopeus pienenee, mikä vaikuttaa myös ruoppaustyössä irtoavan kiintoaineen määrään.

Edellä mainittujen seikkojen perusteella laajamittainen ruoppaustyö on edullisinta tehdä loppusyksystä siian nousun jälkeen.

## 8. Johtopäätökset

Keltin ja Kuusankosken välillä saastuneita maamassoja on arvioitu olevan 76 000–140 000 m<sup>3</sup>. Tällä välillä ovat myös suurimmat pitoisuudet. Keskimääräisten pitoisuuksien perusteella laskien sedimentissä on arvioitu olevan PCDD/F-yhdisteitä 1 500–2 800 kg, joka on noin kolmasosa yhdisteiden kokonaisuudesta (4 000–5 000 kg). Loput 2/3 ovat jakautuneet tasan Kymijoen alaosan ja edustan merialueen kesken. Elohopean saastuneen maan raja-arvo (5 mg/kg) ylittyy Kuusankosken ja Keltin välillä, jossa sedimentin pintakerroksen elohopeapitoisuus on 7 mg/kg. Elohopeapitoisuudet laskevat alavirtaan mentäessä.

Kymijoen sedimentinäytteiden keskimääräinen raekoko  $d_{50}$  on 20–110  $\mu\text{m}$  (ainoastaan yhden näytteen  $d_{50}$  oli 147–161  $\mu\text{m}$ ). Keskimääräinen kosteusprosentti oli noin 74 % sekä hehkutushäviö n. 15 %. Flokkien muodostuminen saattaa vaikuttaa keskimääräiseen raekokoon. Ruoppaajatarkasteluissa valittiin kolme raekokoa,  $d_{50}$ : 20, 60 ja 110  $\mu\text{m}$ . Taulukossa esitetään raekokokoja vastaavat leikkauslujuuden ja laskeutumisenopeuden arvot (Taulukko 38).

*Taulukko 38. Ruoppaajien vertailutarkasteluissa käytettyjä Kymijoen sedimenttien leikkauslujuuden ja laskeutumisenopeuden arvoja.*

	<b>Partikkelin halkaisija 20 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Partikkelin halkaisija 60 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Partikkelin halkaisija 110 <math>\mu\text{m}</math></b>
Kriittinen leikkausjännitys [ $\text{N/m}^2$ ]	0,30	0,40	0,90
Laskeutumisenopeus [ $\text{mm/s}$ ]	0,2	3,5	10,1

Valitulla leikkausjännitysalueella (0,3–0,9  $\text{N/m}^2$ ) kriittinen virtausnopeus tulee olemaan 0,2–0,4 m/s. Tätä suuremmilla nopeuksilla alkaa uoman pohjan syöpyminen. Kymijoella saastuneet alueet sijaitsevat sedimentaatioalueilla, jotka ovat uoman laajentumisissa (lahdet, järvimäiset alueet jne). Ruoppaustyön aikana irtoava kiintoaineseos sekoittuu uoman laajentumassa vaikuttavaan 'akanvirtaukseen'. Osa kiintoaineksestä jää tähän 'akanvirtaukseen' ja lopulta laskeutuu takaisin ruoppausalueelle. Joen päävirtaukseen sekoittuva kiintoaineksen määrä

riippuu uoman päävirtauksen ja pyörivän akanvirtauksen välisestä veden vaihtuvuudesta. Jokivirtauksessa kiintoainesekekoittuu turbulenssin vaikutuksesta koko poikkileikkaukselle ja samalla laimenee. Alhaisen laskeutumisnopeuden ja virtauksen turbulenssin perusteella voidaan olettaa, että suurin osa kulkeutuu päävirtauksen mukana mereen.

Kuusankosken voimalaitoksen alapuolella tulva-aukkojen juoksutukset (tulva, koneistoremontit ja käyttöhäiriöt) aiheuttavat voimalaitoksen alapuolella eroosiota. Eroosion suuruuden ja laajuuden selvittäminen edellyttää hydrologisia ja numeerisia virtausmallilaskentoja (2-D) sekä vesivoimakoneistojen käyttöhäiriötarkasteluja.

Ruoppaustyön aiheuttama kiintoaineen vapautuminen on arvioitu laitteiden työkiertojen perusteella ja sen laskeminen voidaan jakaa seuraaviin osatarkasteluihin:

- kauhan laskeutumiseen perustuva kiintoaineen irtoaminen
- kauhan ollessa pohjalla pilarin eroosiotarkastelun perusteella
- kauhan nostosta aiheutuva kiintoaineen irtoaminen uoman pohjasta
- avoimesta kauhasta tapahtuva ruoppausmassojen karkaaminen.

Kauhan nopeudella on suuri vaikutus vapautuvan kiintoaineen määrään. Esim. kauhan nopeuden kasvaessa 0,3 m:stä/s 0,5 m:iin/s irtoavan kiintoaineen määrä lisääntyy 3–4-kertaiseksi. Avoimella kuokkakauhalla kiintoainetta vapautuu noin 1,1–1,3 kertaa suurempi määrä kuin suljetulla kuokkakauhalla. Pienillä virtausnopeuksilla (0,1 m/s) pumppukauhan liikuttelulla ei ole vaikutusta eroosion suuruuteen. Virtausnopeuden ollessa 0,2 m/s noin kolmasosa eroosiosta aiheutuu liikuttelusta ja virtausnopeuden kasvaessa 0,4 m:iin/s on sen osuus jo 80 %.

Suljetulla kahmarikauhalla ja pumppukauhalla liettyy pienimmät kiintoainemäärät ruopattua m<sup>3</sup>:ä kohti. Virtausnopeuden ollessa suurempi kuin 0,2 m/s irtoavan kiintoaineen määrä alkaa kasvaa voimakkaasti. Virtausnopeuden arvon muuttuessa 0,2 m:stä/s 0,4 m:iin/s irtoavan kiintoaineen määrä kasvaa 1,3–2,9-



kertaiseksi. Muutos on suurin pumppukauhalla, joka työskentelee pohjalla pitkiä aikoja.

Teoreettisen tarkastelun perusteella lasketut vapautuvat kiintoainepitoisuudet ovat pienempiä (max. 20–45 mg/l) kuin kirjallisuudessa esitetyt. Tarkastelun perusteella voidaan päätellä ruoppausmenetelmien keskinäinen paremmuus. Teoreettisen tarkastelun perusteita voidaan tarkentaa tuulitunnelissa tehtävillä kokeilla.

Kuusankosken ja Keltin saastuneiden sedimenttien ruoppauksessa (140 000 m<sup>3</sup>) kiintoainetta on arvioitu liettyvän 5–10 tonnia pumppukauhaa ja suljettua kahmarikauhaa käyttäen, noin 30 tonnia suljettua kuokkakauhaa käyttäen ja noin 40 tonnia avointa kuokkakauhaa käyttäen. Yliruoppauksesta johtuen kiintoainemäärät voivat olla moninkertaiset. Keskimääräisten pitoisuuksien perusteella dioksiinia ja furaania vapautuu 0,4–2,8 kg ja elohopeaa noin 40–270 g ruoppaustavasta riippuen.

Ruoppauksen suorituksessa ammattitaidolla on erittäin suuri merkitys kiintoaineen irtoamiseen. Tarpeettoman suurella kaivusyvytydellä löyhdytetään pohjan maa-ainesta, jolloin myös irtoavan kiintoaineksen määrä kasvaa. Esimerkiksi 5 cm:n ylikavulla saadaan kiintoainemäärän lisäykseksi 40–50 g/s, joka on 4–5-kertainen teoreettisesti arvioituihin verrattuna. Toisaalta kauhauksen kaivuvastus on pieni suuren vesipitoisuuden omaavassa sedimentissä, mikä vaikuttaa ruoppauksen tarkkuuteen. Lisäksi Kymijoen uitetut pohjaan painuneet tukit saattavat aiheuttaa ikävän yllätyksen kiintoaineen irtoamisen suhteen.

Saastuneiden sedimenttien ruoppauksessa, siirrossa ja käsittelyssä on oltava erittäin huolellinen, etteivät työntekijät joudu kosketuksiin haitallisten aineiden kanssa eivätkä haitalliset aineet pääse veteen tai puhtaalle maa-alueelle. Työntekijöiden on oltava ammattitaitoisia sekä tietoisia aineiden haitallisuudesta ja vahingollisuudesta ympäristölle. Kymijoen saastuneiden sedimenttien vesipitoisuus on suuri, joten ennen käsittelyä on syytä poistaa vesi. Vesi voidaan poistaa sedimentistä hihna-, imu- tai painesuodatuksella. Haitalliset aineet ovat sitoutuneet hienojakoiseen sedimenttiin, joten kitkamaalajit voidaan erottaa seulomalla ja ottaa uudelleen käyttöön. Dioksiinia ja furaania sisältävät sedimentit voidaan käsitellä polttamalla tai uuttamalla liuottimilla. Jos sedimentti sisältää myös elohopeaa, se on käsiteltävä erikseen (esim. kemiallisesti uuttamalla). Puhdis-

tusmenetelmiä ei ole käytetty suurten dioksiini- ja furaanipitoisuuksien käsittelyyn, joten toimenpiteiden tehokkuudesta ei ole täyttä varmuutta.

Jos laajamittaiseen saastuneiden sedimenttien ruoppaamiseen päädytään, on ruoppaustyö suoritettava syksyllä pienten virtaamien aikaan.

Parametrien herkkyyttä voidaan arvioida numeerisissa tarkasteluissa Valkeakosken kuitupitoisella sedimentillä tehtyjen fysikaalisten mallikokeiden tulosten ja kirjallisuudesta löytyneiden leikkauslujuuden arvojen perusteella sekä käyttämällä erilaisia eroosionopeuksia.

## 9. Yhteenveto

1990-luvun alkupuolella havaittiin Kymijoen sedimenttien sisältävän suuria pitoisuuksia organoklooriyhdisteitä, erityisesti myrkyllisiä PCDD- ja PCDF-yhdisteitä (dioksiini- ja furaaniyhdisteitä), sekä pohjaeläimissä olevan kehitysvaurioita. Vuosina 1996–1999 useat tutkimuslaitokset osallistuiivat nk. KYPRO-projektiin, jossa tutkittiin Kymijoen pohjan tilaa. Tämän projektin tutkimustuloksia on esitetty Suomen ympäristökeskuksen julkaisussa 'Organoklooriyhdisteet ja raskasmetallit Kymijoen sedimentissä: esiintyminen, kulkeutuminen, vaikutukset ja terveystriskit'.

Suomen ympäristökeskus tilasi 7.2.2000 VTT Valmistustekniikalta selvityksen Kymijoen saastuneiden sedimenttien käsittelymahdollisuuksista. Työn tavoitteena on ollut arvioida erilaisten ruoppausmenetelmien liettämän kiintoaineen määrää virtaavassa vedessä. Teoreettisen tarkastelun lähtökohtana on ollut ruoppaustyöstä aiheutuva virtaustilan muutos ja sen perusteella määritetty paikallinen eroosio. Keväällä 2001 on tarkoitus suorittaa Kymijoella koeruoppaus, jolloin määritettyjä arvoja voidaan verrata teoreettisesti arvioituihin.

Kymijoen päähaara on puunjalostus- ja paperiteollisuuden vaikutuspiirissä olevaa aluetta. Laajempi teollinen toiminta on alkanut 1800-luvun loppupuolella.

Kuusankoskella valmistettiin vuosina 1940–1984 yhteensä 23 780 tonnia puutavaran sinistymisen estoon käytettyä KY 5:tä. Pesuvesien mukana vesistöön on kulkeutunut liukenemattomia sivutuotteita 5–30 kg/kuukaudessa. Huomattava osa jokeen joutuneista yhdisteistä on peräisin peroksitehtaan palosta vuodelta 1960.

Kuusansaaren kloorialkalitehtaan elohopeapäästöt ovat alkaneet 1936 ja niiden määrä vuosina 1950–1967 oli n 550 kg/a. Kymmenessä vuodessa kuormitus väheni alle 2 kg/aan/a ja nykyisin se on alle 1 kg/a. Kymijoen alaosan elohopeakuormituksen on vuoden 1950 jälkeen arvioitu olleen yhteensä n. 31 tonnia. Historiallinen kuormitus on tätä hieman suurempi.

Keltin ja Kuusankosken välillä on arvioitu olevan saastuneita maamassoja 76 000–140 000 m<sup>3</sup>. Tällä välillä ovat myös suurimmat pitoisuudet. Keskimääräisten pitoisuuksien perusteella laskien sedimentissä on arvioitu olevan

PCDD/F-yhdisteitä 1 500–2 800 kg, joka on noin kolmasosa yhdisteiden kokonaismäärästä (4 000–5 000 kg). Loput 2/3 ovat jakautuneet tasan Kymijoen alaosan ja edustan merialueen kesken. Elohopean saastuneen maan raja-arvo (5 mg/kg) ylittyy Kuusankosken ja Keltin välillä, jossa sedimentin pintakerroksen elohopeapitoisuus on 7 mg/kg. Elohopeapitoisuudet laskevat alavirtaan mentäessä.

Joissa ja järvissä suspensiohiukkaset ovat merkittävimpiä epäpuhtauksien kuljettajia. Yleensä 90 % raskasmetalleista on sitoutunut suspensioainekseen ja sedimenttiin. Jokivedessä suspendoituneen sedimentin hienoaines sisältää yhdistyneitä partikkeleita (flokkeja), joiden syntymiseen vaikuttavat biologiset prosessit, bakteeritoiminta ja tahmeat polymeeriset kuidut. Flokkien muodostumiseen vaikuttaa suspendoituneen sedimentin määrä.

Kymijoen sedimenttinäytteiden keskimääräinen raekoko  $d_{50}$  on 20–110  $\mu\text{m}$  (ainoastaan yhden näytteen  $d_{50}$  oli 147–161  $\mu\text{m}$ ) ja keskimääräinen kosteusprosentti oli noin 74 % sekä hehkutushäviö n. 15 %. Flokkien muodostuminen saattaa vaikuttaa keskimääräiseen raekokoon. Ruoppajatarkasteluissa valittiin kolme raekokoa,  $d_{50}$ : 20, 60 ja 110  $\mu\text{m}$ . Partikkelin halkaisijan perusteella valitulla leikkausjännitysalueella (0,3–0,9  $\text{N/m}^2$ ) kriittinen virtausnopeus tulee olemaan 0,2–0,4 m/s. Tätä suuremmilla nopeuksillaalkaa uoman pohjan syöpyminen.

Huttula et al. (1990) ovat määrittäneet Valkeakosken kuitupitoiselle sedimentille leikkauslujuuden arvon 0,008  $\text{N/m}^2$ , jota vastaava kriittinen virtausnopeus on noin 3,5 cm/s. Kymijoen virtaus- ja sedimenttimallituksessa on käytetty pintakerroksen kriittisen leikkauslujuuden arvona 0,5  $\text{N/m}^2$ .

Kymijoella saastuneet alueet sijaitsevat sedimentaatioalueilla, jotka ovat uoman laajentumissa (lahdet, järvimäiset alueet, jne). Ruoppaustyön aikana irtoava kiintoaines sekoittuu uoman laajentumassa vaikuttavaan 'akanvirtaukseen'. Osa kiintoaineksesta jää tähän 'akanvirtaukseen' ja lopulta laskeutuu takaisin ruoppausalueelle. Joen päävirtaukseen sekoittuva kiintoaineksen määrä riippuu uoman päävirtauksen ja pyörivän akanvirtauksen välisestä vedenvaihtuvuudesta. Jokivirtauksessa kiintoaines sekoittuu turbulenssin vaikutuksesta koko poikki-leikkausalalle ja samalla laimenee. Alhaisen laskeutumisenopeuden ja virtauksen

turbulenssin perusteella voidaan olettaa, että suurin osa kulkeutuu päävirtauksen mukana mereen.

Kuusankosken voimalaitoksen alapuolella tulva-aukkojen juoksutukset aiheuttavat eroosiota voimalaitoksen alapuolella. Eroosion suuruuden ja laajuuden selvittäminen edellyttää hydrologisia ja numeerisia virtausmallilaskentoja (2-D) sekä vesivoimakoneistojen käyttöhäiriötarkasteluja.

Rokoschin (1993) mukaan saastuneiden sedimenttien ympäristöystävällisen ruoppauksen kriteerit ovat mm. turvallisuus, ruoppausmateriaalin vuotojen ja päästöjen määrä, veden samentuminen, ruoppauksen tarkkuus ja selektiivisyys. Hänen mukaansa mm. kahmari-, kuokka- ja pumppukauhaa, levyleikkuriruoppaajaa sekä Pneumaa ja Oozeria voidaan pitää ympäristöystävällisinä ruoppaajina.

Keravanjoen Matarinkosken yläpuolella vuosina 1991–1992 suoritettujen savi- maiden ruoppaustöiden yhteydessä tutkittiin irtoavan kiintoaineen määrää. Kuokka- ja laahakauhalla suoritettujen ruoppausten yhteydessä vapautuvan kiintoaineen prosenttiosuus oli verrannollinen virtausnopeuden neliöön ( $0,6-0,7 u^2$ ). Kalajoen Hamarinkosken keskitiiviin moreenin ruoppausten yhteydessä mitattiin liettyvien ruoppausmassojen määräksi noin 3–5 % kokonaismäärästä.

Hollantilaisten tekemien tutkimusten perusteella avoimen kahmari- ja kuokkauhan aiheuttama samentuma on noin 2,5–3-kertainen suljettuun verrattuna. Välittömästi kuokka- ja kahmarikauharuoppaajan takana kiintoainepitoisuus oli 170 mg/l.

Erikoisruoppaajien aiheuttama kiintoainepitoisuus on alle 10 mg/l (Clean up 1–7 mg/l, Oozer 6 mg/l). Pneumaattisten ruoppaajien haittapuolena on suuri ruoppausvyvyys. Mud Cat -ruoppaajaa on käytetty jokiolosuhteissa Welland-joella, ja todettu keskimääräinen kiintoainepitoisuus ruoppaajan takana oli noin 50 mg/l. Lisäksi levyleikkuriruoppaaja vaikuttaa Kymijoen olosuhteisiin käyttökelpoiselta.

Virtaavassa vedessä silttiverhojen käyttö on hankalaa. Virtausnopeuden tulisi olla korkeintaan noin 0,25 m/s, jotta silttiverhoja voidaan käyttää.

Kenttäkokeissa kaivavana koneena käytetään Vesimestaria, jonka normaalivärustus on pumppukauha. Kokeissa samaan laitteeseen vaihdetaan myös kuokkakauha ja suljettu kuokkakauha. Erkki Mykkänen, Syke, on määrittänyt työkierron 17–20 tonnin kaivureista tehtyjen työtutkimusten perusteella. Laitteiden peruskierro on 29–72 sekuntia.

Ruoppauksen aiheuttama kiintoaineen vapautuminen arvioitiin laitteiden työkiertojen perusteella, ja sen laskeminen voidaan jakaa seuraaviin osatarkasteluihin:

- kauhan laskeutumiseen perustuva kiintoaineen irtoaminen
- kauhan ollessa pohjalla pilarin eroosiotarkastelun perusteella
- kauhan nostosta aiheutuva kiintoaineen irtoaminen uoman pohjasta
- avoimesta kauhasta tapahtuva ruoppausmassojen karkaaminen.

Kauhan nopeudella on suuri vaikutus vapautuvan kiintoaineksen määrään. Esim. kauhan nopeuden kasvaessa 0,3 m:stä/s 0,5 m:iin/s irtoavan kiintoaineksen määrä lisääntyy 3–4-kertaiseksi. Avoimella kuokkakauhalla kiintoainetta vapautuu noin 1,1–1,3 kertaa suurempi määrä kuin suljetulla kuokkakauhalla.

Suljetulla kahmarikauhalla ja pumppukauhalla liettyy pienimmät kiintoainemäärät ruopattua m<sup>3</sup>:ä kohti. Virtausnopeuden ollessa suurempi kuin 0,2 m/s alkaa irtoavan kiintoaineen määrä kasvaa voimakkaasti. Virtausnopeuden arvon muuttuessa 0,2 m:stä/s 0,4 m:iin/s irtoavan kiintoaineksen määrä kasvaa 1,3–2,9-kertaiseksi. Muutos on suurin pumppukauhalla, joka työskentelee pohjalla pitkiä aikoja.

Teoreettisen tarkastelun perusteella lasketut vapautuvat kiintoainepitoisuudet ovat pienempiä (max. 20–45 mg/l) kuin kirjallisuudessa esitetyt. Tarkastelun perusteella voidaan kuitenkin päätellä ruoppausmenetelmien keskinäinen parermmuus. Teoreettisen tarkastelun perusteita voidaan tarkentaa tuulitunnelissa tehtävillä kokeilla.

Kuusankosken ja Keltin saastuneiden sedimenttien ruoppauksessa (140 000 m<sup>3</sup>) kiintoainetta on arvioitu liettyvän 5–10 tonnia pumppukauhaa ja suljettua kah-

marikauhaa käyttäen, noin 30 tonnia suljettua kuokkakauhaa käyttäen ja noin 40 tonnia avointa kuokkakauhaa käyttäen. Yliruoppauksesta johtuen kiintoainemäärät voivat olla moninkertaiset. Keskimääräisten pitoisuuksien perusteella dioksiinia ja furaania vapautuu 0,4–2,8 kg ja elohopeaa noin 40–270 g ruoppaustavasta riippuen.

Ruoppauustyön suorituksessa ammattitaidolla on erittäin suuri merkitys kiintoaineen irtoamiseen. Tarpeettoman suurella kaivusyvyydellä löyhdytetään pohjan maa-ainesta, jolloin myös irtoavan kiintoaineksen määrä kasvaa. Esimerkiksi 5 cm:n ylikaivulla saadaan kiintoainemäärän lisäykseksi 40–50 g/s, joka on 4–5-kertainen teoreettisesti arvioituihin verrattuna. Toisaalta kauhan kaivuvastus suuren vesipitoisuuden omaavassa sedimentissä on pieni, mikä vaikuttaa ruoppaustyön tarkkuuteen. Lisäksi Kymijoella uitetut pohjaan painuneet tukit saattavat aiheuttaa ikävän yllätyksen kiintoaineen irtoamisen suhteen.

Saastuneiden sedimenttien ruoppauksessa, siirrossa ja käsittelyssä on oltava erittäin huolellinen, etteivät työntekijät joudu kosketuksiin haitallisten aineiden kanssa eivätkä haitalliset aineet pääse veteen tai puhtaalle maa-alueelle. Työntekijöiden on oltava ammattitaitoisia sekä tietoisia aineiden haitallisuudesta ja vahingollisuudesta ympäristölle. Kymijoen saastuneiden sedimenttien vesipitoisuus on suuri, joten ennen käsittelyä on syytä poistaa vesi. Vesi voidaan poistaa sedimentistä hihna-, imu- tai painesuodatuksella. Haitalliset aineet ovat sitoutuneet hienojakoiseen sedimenttiin, joten kitkamaalajit voidaan erottaa seulomalla ja ottaa uudelleen käyttöön. Dioksiinia ja furaania sisältävät sedimentit voidaan käsitellä polttamalla tai uuttamalla liuottimilla. Jos sedimentti sisältää myös elohopeaa, se on käsiteltävä erikseen (esim. kemiallisesti uuttamalla). Puhdistusmenetelmiä ei ole käytetty suurten dioksiini- ja furaanipitoisuuksien käsitteilyyn, joten toimenpiteiden tehokkuudesta ei ole täyttä varmuutta.

Jos päädytään laajamittaiseen saastuneiden sedimenttien ruoppaamiseen, ruoppaustyö on suoritettava syksyllä pienten virtaamien aikaan.

Parametrien herkkyyttä voidaan arvioida numeerisissa tarkasteluissa Valkeakosken kuitupitoisella sedimentillä tehtyjen fysikaalisten mallikokeiden tulosten ja kirjallisuudesta löytyneiden leikkauslujuuden arvojen perusteella sekä käyttämällä erilaisia eroosionopeuksia.

## Lähdeluettelo

**Billfalk**, L. 1992. Ice effects and control for hydro power production. IAHR Ice Symposium, Banff, Alberta. S. 1206–1220.

**Blomqvist**, E. (toim.) 1911. Lisiä Suomen hydrografiaan II. Kymijoki ja sen vesistö. Osakeyhtiö F. Tilgmannin kirja- ja kivipaino. Helsinki.

**Breusers**, H. N. C. 1988. Lecture notes on sediment transport 1. International Course in Hydraulic Engineering. Waterloopkundig laboratorium, WL. Delft.

**Bubb**, J. M., Williams, T. P. & Lester, J. N. 1993. The Behaviour of Mercury within a Contaminated Tidal River System. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 28., No. 8–9, s. 329–338.

**Buchberger**, C. 1993. Environment Canada Demonstrations. Remediation Technologies for the Removal of Contaminated Sediment in Great Lakes. *Terra et Aqua*. No. 50, January, s. 3–13.

**Calmano**, W., Hong, J. & Förstner, U. 1993. Binding and Mobilization of Heavy Metals in Contaminated Sediments Affected by pH and Redox Potential. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 28., No. 8–9, s. 223–235.

**Chang**, H. H. 1988. *Fluvial Processes in River Engineering*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.

**Collins**, M. A. 1995. Dredging-Induced Near-Field Resuspended Sediment Concentrations and Source Strengths. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Miscellaneous Paper D-95-2.

**Diepen**, H. van, Aunt, A., Raalte, G.H. van & Pennekamp, J. G. S. 1993. Dredging and the environment: New developments from the Netherlands. *PIANC Bulletin*. No. 80, s. 29–36.

**DiGasbarro**, P., Henningson, J., Pottecher, G. & Cardoni, J. J. 1998. Solvent Extraction Process Development to Decontaminate Sediments. National Confe-



rence on Management and Treatment of Contaminated Sediments. Proceedings. Cincinnati, OH, May 13–14, 1997. EPA/625/R-98/001. S. 119–130.

**Droppo, I. G. & Ongley, E. D.** 1992. The State of Suspended Sediment in the Freshwater Fluvial Environment: A Method of Analysis. *Wat. Res.* Vol. 26, No. 1, s. 65–72.

**Droppo, I. G. & Ongley, E. D.** 1994. Flocculation of Suspended Sediment in Rivers of Southeastern Canada. *Wat. Res.* Vol. 28, No. 8, s. 1799–1809.

**Eskola, T. (toim.)** 1999. Kymijoen vesistön tulvantorjunnan toimintasuunnitelma. Alueelliset ympäristöjulkaisut 118. Kaakkois-Suomen ympäristökeskus. Kouvola. 185 s.

**Ettema, R., Melville, B. W. & Barkdoll, B.** 1996. Pier width and local-scour depth. North American Water and Environment Congress. 6 s.

**Götz, R., Steiner, B., Sievers, S., Friesel, P., Roch, K., Schwörer, R. & Haag, F.** 1998. Dioxin, Dioxin-like PCBs and Organotin Compounds in the River Elbe and the Hamburg Harbour: Identification of Sources. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 37, No. 6–7, s. 207–215.

**Hakstege, A. L., Heynen, J. J. M., Eenhorn, J. K. & Versteeg, H. P.** 1998. Strategies for Management of Contaminated Sediments within the Meuse River-system. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 37, No. 6–7, s. 419–424.

**Havis, R. N.** 1988. Sediment Resuspension of Selected Dredges. Environmental Effects of Dredging. Technical Notes. EEDP-09-2. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

**Hayes, D. F.** 1986. Guide to Selecting a Dredge for Minimizing Resuspension of Sediment. Environmental Effects of Dredging. Technical Notes. EEDP-09-1. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

**Hayes, D. F.** 1988. A Preliminary Evaluation of Contaminant Release at the Point of Dredging. Environmental Effects of Dredging. Technical Notes. EEDP-

09-3. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

**Herbich**, J. B. 1992. Handbook of Dredging Engineering. McGraw-Hill, Inc. New York.

**Herrmann**, J., Krause, J. C., Tsoupikova, N. & Hansen, K. (compiled by). 1999. Marine Sediment Extraction in the Baltic Sea. Status report. Baltic Sea Environment Proceedings, No. 76. Helsinki Commission. Baltic Marine Environment Protection Commission.

**Hosokawa**, Y. 1993. Remediation Work for Mercury Contaminated Bay – Experiences of Minamata Bay Project, Japan. Wat. Sci. Tech. Vol. 28, No. 8–9, s. 339–348.

**Huttula**, T. & Krogerus, K. 1986. Water currents and erosion of cellulose fibers in a short term regulated water course. Aqua Fennica. Vol. 16, No. 2, s. 167–180.

**Huttula**, T., Krogerus, K. & Virtanen, M. 1990. Interactions between water currents and sediment effluents. Encyclopedia of Fluid Mechanics. Volume 10. Surface and Groundwater Flow Phenomena. Chapter 6. S. 211–265.

**Hyvärinen**, V. (toim). 1998. Hydrologinen vuosikirja 1994. Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 176. Helsinki.

**Jansen**, P. Ph, Bengedon, L. van, J. van den Berg, J. de Vries, M. & Zanen, A. 1979. Principles of River Engineering. The non-tidal alluvial river. Pitman, London.

**Johnson**, B. H. & Pachure, N. 1999. Estimating Dredging Sediment Resuspension Sources. Technical Note DOER-E6. March.

**Kaakkois-Suomen ympäristökeskus**. 2000. Taustatietoa Kymijoen ruoppauksien valvontaan.

**Lounais-Suomen ympäristökeskus.** 2000. Kokemäenjoen pohjasedimentin elohopeatutkimushuittisten vesiniityllä 16.–17.2.2000. 30.3.2000. 5 s.

**Malve, O., Salo, S., Lehtoranta, J. & Verta, M.** 1999. Sedimenttiselvitys Kymppi-voima Oy:n Elimäen voimalaitoshankkeen ympäristövaikutusten arviointiin liittyen. Suomen ympäristökeskuksen moniste 143. Helsinki.

**Merenkulkulaitos.** 2000. Kymijoen kanava. Alustava yleissuunnitelma. Merenkulkulaitos ja Suomalainen Insinööritoimisto Oy. 14.3.2000

**Netzband, A., Christiansen, H., Maass, B. & Werner, G.** 1998. Relocation of Dredged Material from Hamburg Harbour in the River Elbe. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 37, No. 6–7, s. 241–248.

**Palermo, M. R.** 1998. Design Consideration for IN-SITU Capping of Contaminated Sediments. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 37, No. 6–7, s. 315–321.

**Palermo, M. R., Clausner, J. E., Rollins, M. P., Williams, G. L., Myers, T. E., Fredette, T. J. & Randall, R. E.** 1998. Guidance for Subaqueous Dredged Material Capping. U.S. Army Corps of Engineering. Waterways Experiment Station. Technical Report DOER-1. June.

**Pennekamp, J. G. S., Epskamp, R. J. C., Rosenbrand, W. F., Mullie, A., Wessel, G. L., Arts, T. & Deibel, I. K.** 1996. Turbidity caused by Dredging; Viewed in Perspective. *Terra et Aqua.* No. 64, September, s. 10–17.

**Phillips, J. M. & Walling, D. E.** 1995. An Assessment of the Effect of Sample Collection, Storage and Resuspension on the Representativeness of Measurements of the Effective Particle Size Distribution of Fluvial Suspended Sediment. *Wat. Res.* Vol. 29, No. 11, s. 2498–2508.

**Press, H. & Schröder, R.** 1966. *Hydromechanik im Wasserbau.* Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin.

**Rantakangas, J.** 1992. Perkauksen aiheuttaman kiintoainevirtaaman ennakointi. Vesi- ja ympäristöhallituksen julkaisuja. A 89. 89 s.

**Riipi, T.** 1997. Ruoppaus- ja läjitystekniikoiden valinta maalajien ominaisuuksien ja ympäristövaikutuksien perusteella. VTT Tiedotteita 1853. 66 s. + liitt. 40 s.

**Rokosch, W. D.** 1993. Dredging: A Clean Up Technique for Contaminated Aquatic Sediments. Terra et Aqua. No. 50, January, s. 23–36.

**Rosen et al.** 1994.

**Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL).** 1982. Yleinen vesitekniikka. RIL 151. Helsinki.

**Suomen ympäristökeskus.**

**Teeter, A. M.** 1992. Erosion of cohesive dredged material in open-water disposal sites. Dredging Research Technical Notes. DRP-1-07.

**Teeter, A. M.** 1993. Size dependence in fine-grained sediment transport. Dredging Research Technical Notes. DRP-1-07.

**Tolhurst, T. J., Black, K. S., Shayler, S. A., Mather, S., Black, I., Baker K. & Paterson, D. M.** 1999. Measuring the *in situ* Erosion Shear Stress of Intertidal Sediments with the Cohesive Strength Meter (CSM). Estuarine, Coastal and Shelf Science. Vol. 49, s. 281–294.

**USACE (U.S. Army Corps of Engineers).** 1983. Dredging and Dredged Material Disposal. EM 1110-2-5025. Washington, D.C.

**USEPA (U.S. Environmental Protection Agency).** 1991. Remediation of Contaminated Sediments. Handbook. EPA/625/6-91/028. April.

**USEPA (U.S. Environmental Protection Agency).** 1993. Selecting Remediation Techniques for Contaminated Sediment. EPA-823-B93-001. June.

**Vartiainen, T., Kiviranta, H., Tuomisto, J., Kohonen, T. & Salonen, V.-P.** 1997. Sköldvikin läheisen merialueen PCDD-, PCDF- ja PCB-määrät pohjasedimentissä. Loppuraportti.

**Verta, M.** et al. 1999. Organoklooriyhdisteet ja raskasmetallit Kymijoen sedimentissä: esiintyminen, kulkeutuminen, vaikutukset ja terveystriskit. Suomen ympäristö 334. Suomen ympäristökeskus. Helsinki. 73 s.

**Virtanen, M., Kouvalainen, S., Korhonen, P., Schultz, T.** et al. 1992. Kiintoaineen irtoaminen Keravanjoen perkauksista 1991–1992. Julkaisematon.

**VTT Valmiustustekniikka.** Ympärivuotisen liikenteen mahdollisuudet Saimaan kanavassa ja suunnitellussa Kymijoen–Mäntyharjun kanavaparissa. Yhteenvetoraportti BVAL 34-001004. Espoo. 23 s. + liitt. 5 s.

**Wren, D. G., Barkdoll, B. D., Kuehl, R. A. & Derrow, R. W.** 2000. Field Techniques for Suspended-Sediment Measurements. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 2, February, s. 97–104.



**Liite**  
**Ruoppaajien vertailu**





<b>Kauhan nopeus</b>																						
		0,3	m/s																			
<b>Suljettu kuokkakauha</b>		pohjapinta-ala		0,93		leveys	1,55		tilavuus	0,7	m3											
		0,3 N/m2							0,4 N/m2						0,9 N/m2							
		0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s	0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s		
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,2	5	0,43	13,33	0,43	13,33	0,43	13,33	0,2	6,20	0,2	6,20	0,2	6,20	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	täyttö	15	0,93	15	0	0,00	0,78	10,88	4,62	64,45	0	0,00	0,46	6,42	3,34	46,59	0	0,00	0	0,00	1,21	16,88
	nosto	6	7,13	5	0,43	15,33	0,43	15,33	0,43	15,33	0,2	7,13	0,2	7,13	0,2	7,13	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	<b>yhTEENSÄ</b>	<b>31</b>		<b>25</b>		<b>28,66</b>		<b>39,54</b>		<b>93,11</b>		<b>13,33</b>		<b>19,75</b>		<b>59,92</b>		<b>0,00</b>		<b>0,00</b>		<b>16,88</b>
<b>Avoin kuokkakauha</b>																						
		pohjapinta-ala		0,93		leveys	1,55		tilavuus	0,7	m3											
		0,3 N/m2							0,4 N/m2						0,9 N/m2							
		0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s	0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s		
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	1,271	5	0,645	17,43	0,645	17,43	0,645	17,43	0,3	8,11	0,3	8,11	0,3	8,11	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	täyttö	10	0,93	10	0	0,00	1,17	10,88	6,93	64,45	0	0,00	0,69	6,42	5,01	46,59	0	0,00	0	0,00	1,815	16,88
	nosto	6	1,271	5	0,645	19,43	0,645	19,43	0,645	19,43	0,3	9,04	0,3	9,04	0,3	9,04	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	<b>yhTEENSÄ</b>	<b>26</b>				<b>36,86</b>		<b>47,74</b>		<b>101,31</b>		<b>17,14</b>		<b>23,56</b>		<b>63,74</b>		<b>0,00</b>		<b>0,00</b>		<b>16,88</b>
<b>Pumppukauha</b>																						
		pohjapinta-ala		0,96		leveys	1,6		tilavuus	0,7	m3											
		0,3 N/m2							0,4 N/m2						0,9 N/m2							
		0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s	0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s		
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,4	5	0,43	13,76	0,43	13,76	0,43	13,76	0,2	6,40	0,2	6,40	0,2	6,40	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	täyttö	60	0,96	60	0	0,00	1,56	89,86	9,24	532,22	0	0,00	0,92	52,99	6,68	384,77	0	0,00	0	0,00	2,42	139,39
	nosto	6	7,36	5	0,43	15,82	0,43	15,82	0,43	15,82	0,2	7,36	0,2	7,36	0,2	7,36	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	<b>yhTEENSÄ</b>	<b>76</b>				<b>29,58</b>		<b>119,44</b>		<b>561,81</b>		<b>13,76</b>		<b>66,75</b>		<b>398,53</b>		<b>0,00</b>		<b>0,00</b>		<b>139,39</b>
<b>Kahmarikauha</b>																						
		pohjapinta-ala		3,4784		leveys	1,6		tilavuus	2,84	m3											
		0,3 N/m2							0,4 N/m2						0,9 N/m2							
		0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s	0,1 m/s			0,2 m/s		0,4 m/s		
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,4	5	0,43	13,76	0,43	13,76	0,43	13,76	0,2	6,40	0,2	6,40	0,2	6,40	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	täyttö	20	3,4784	10	0	0,00	0,78	27,13	4,62	160,70	0	0,00	0,46	16,00	3,34	116,18	0	0,00	0	0,00	1,21	42,09
	nosto	10	9,8784	5	0,43	21,24	0,43	21,24	0,43	21,24	0,2	9,88	0,2	9,88	0,2	9,88	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	<b>yhTEENSÄ</b>	<b>40</b>				<b>35,00</b>		<b>62,13</b>		<b>195,70</b>		<b>16,28</b>		<b>32,28</b>		<b>132,46</b>		<b>0,00</b>		<b>0,00</b>		<b>42,09</b>

<b>Kauhan nopeus</b>		0,5	m/s																			
<b>Suljettu kuokkakauha</b>		pohjapinta-ala		0,93		leveys	1,55		tilavuus	0,7	m3											
				0,3 N/m2					0,4 N/m2								0,9 N/m2					
				0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s	0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s			
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,2	5	2,1	65,10	2,1	65,10	2,1	65,10	1,45	44,95	1,45	44,95	1,45	44,95	0,37	11,47	0,37	11,47	0,37	11,47
	täyttö	15	0,93	15	0	0,00	0,78	10,88	4,62	64,45	0	0,00	0,46	6,42	3,34	46,59	0	0,00	0	0,00	1,21	16,88
	nosto	6	7,13	5	2,1	74,87	2,1	74,87	2,1	74,87	1,45	51,69	1,45	51,69	1,45	51,69	0,37	13,19	0,37	13,19	0,37	13,19
	<b>yhTEENSÄ</b>	<b>31</b>		<b>25</b>		<b>139,97</b>		<b>150,85</b>		<b>204,41</b>		<b>96,64</b>		<b>103,06</b>		<b>143,24</b>		<b>24,66</b>		<b>24,66</b>		<b>41,54</b>
<b>Avoin kuokkakauha</b>		pohjapinta-ala		0,93		leveys	1,55		tilavuus	0,7	m3											
				0,3 N/m2					0,4 N/m2								0,9 N/m2					
				0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s	0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s			
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	1,271	5	3,15	85,12	3,15	85,12	3,15	85,12	2,175	58,77	2,175	58,77	2,175	58,77	0,555	15,00	0,555	15,00	0,555	15,00
	täyttö	10	0,93	10	0	0,00	1,17	10,88	6,93	64,45	0	0,00	0,69	6,42	5,01	46,59	0	0,00	0	0,00	1,815	16,88
	nosto	6	1,271	5	3,15	94,88	3,15	94,88	3,15	94,88	2,175	65,51	2,175	65,51	2,175	65,51	0,555	16,72	0,555	16,72	0,555	16,72
	<b>yhTEENSÄ</b>	<b>26</b>				<b>180,00</b>		<b>190,88</b>		<b>244,45</b>		<b>124,29</b>		<b>130,70</b>		<b>170,88</b>		<b>31,71</b>		<b>31,71</b>		<b>48,59</b>
<b>Pumppukauha</b>		pohjapinta-ala		0,96		leveys	1,6		tilavuus	0,7	m3											
				0,3 N/m2					0,4 N/m2								0,9 N/m2					
				0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s	0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s			
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,4	5	2,1	67,20	2,1	67,20	2,1	67,20	1,45	46,40	1,45	46,40	1,45	46,40	0,37	11,84	0,37	11,84	0,37	11,84
	täyttö	60	0,96	60	0	0,00	1,56	89,86	9,24	532,22	0	0,00	0,92	52,99	6,68	384,77	0	0,00	0	0,00	2,42	139,39
	nosto	6	7,36	5	2,1	77,28	2,1	77,28	2,1	77,28	1,45	53,36	1,45	53,36	1,45	53,36	0,37	13,62	0,37	13,62	0,37	13,62
	<b>yhTEENSÄ</b>	<b>76</b>				<b>144,48</b>		<b>234,34</b>		<b>676,70</b>		<b>99,76</b>		<b>152,75</b>		<b>484,53</b>		<b>25,46</b>		<b>25,46</b>		<b>164,85</b>
<b>Kahmarikauha</b>		pohjapinta-ala		3,4784		leveys	1,6		tilavuus	2,84	m3											
				0,3 N/m2					0,4 N/m2								0,9 N/m2					
				0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s	0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s			
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,4	5	2,1	67,20	2,1	67,20	2,1	67,20	1,45	46,40	1,45	46,40	1,45	46,40	0,37	11,84	0,37	11,84	0,37	11,84
	täyttö	20	3,4784	10	0	0,00	0,78	27,13	4,62	160,70	0	0,00	0,46	16,00	3,34	116,18	0	0,00	0	0,00	1,21	42,09
	nosto	10	9,8784	5	2,1	103,72	2,1	103,72	2,1	103,72	1,45	71,62	1,45	71,62	1,45	71,62	0,37	18,28	0,37	18,28	0,37	18,28
	<b>yhTEENSÄ</b>	<b>40</b>				<b>170,92</b>		<b>198,05</b>		<b>331,63</b>		<b>118,02</b>		<b>134,02</b>		<b>234,20</b>		<b>30,12</b>		<b>30,12</b>		<b>72,20</b>

Kauhan nopeus		0,7	m/s																			
Suljettu kuokkakauha		pohjapinta-ala		0,93		leveys	1,55		tilavuus	0,7	m3											
			0,3 N/m2						0,4 N/m2						0,9 N/m2							
			0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s			
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,2	5	4,59	142,29	4,59	142,29	4,59	142,29	3,32	102,92	3,32	102,92	3,32	102,92	1,2	37,20	1,2	37,20	1,2	37,20
	täyttö	15	0,93	15	0	0,00	0,78	10,88	4,62	64,45	0	0,00	0,46	6,42	3,34	46,59	0	0,00	0	0,00	1,21	16,88
	nosto	6	7,13	5	4,59	163,63	4,59	163,63	4,59	163,63	3,32	118,36	3,32	118,36	3,32	118,36	1,2	42,78	1,2	42,78	1,2	42,78
	<b>yhhteensä</b>	<b>31</b>		<b>25</b>		<b>305,92</b>		<b>316,80</b>		<b>370,37</b>		<b>221,28</b>		<b>227,70</b>		<b>267,87</b>		<b>79,98</b>		<b>79,98</b>		<b>96,86</b>
Avoin kuokkakauha		pohjapinta-ala		0,93		leveys	1,55		tilavuus	0,7	m3											
			0,3 N/m2						0,4 N/m2						0,9 N/m2							
			0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s			
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	1,271	5	6,885	186,04	6,885	186,04	6,885	186,04	4,98	134,57	4,98	134,57	4,98	134,57	1,8	48,64	1,8	48,64	1,8	48,64
	täyttö	10	0,93	10	0	0,00	1,17	10,88	6,93	64,45	0	0,00	0,69	6,42	5,01	46,59	0	0,00	0	0,00	1,815	16,88
	nosto	6	1,271	5	6,885	207,39	6,885	207,39	6,885	207,39	4,98	150,01	4,98	150,01	4,98	150,01	1,8	54,22	1,8	54,22	1,8	54,22
	<b>yhhteensä</b>	<b>26</b>				<b>393,43</b>		<b>404,31</b>		<b>457,88</b>		<b>284,57</b>		<b>290,99</b>		<b>331,17</b>		<b>102,86</b>		<b>102,86</b>		<b>119,74</b>
Pumppukauha		pohjapinta-ala		0,96		leveys	1,6		tilavuus	0,7	m3											
			0,3 N/m2						0,4 N/m2						0,9 N/m2							
			0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s			
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,4	5	4,59	146,88	4,59	146,88	4,59	146,88	3,32	106,24	3,32	106,24	3,32	106,24	1,2	38,40	1,2	38,40	1,2	38,40
	täyttö	60	0,96	60	0	0,00	1,56	89,86	9,24	532,22	0	0,00	0,92	52,99	6,68	384,77	0	0,00	0	0,00	2,42	139,39
	nosto	6	7,36	5	4,59	168,91	4,59	168,91	4,59	168,91	3,32	122,18	3,32	122,18	3,32	122,18	1,2	44,16	1,2	44,16	1,2	44,16
	<b>yhhteensä</b>	<b>76</b>				<b>315,79</b>		<b>405,65</b>		<b>848,02</b>		<b>228,42</b>		<b>281,41</b>		<b>613,18</b>		<b>82,56</b>		<b>82,56</b>		<b>221,95</b>
Kahmarikauha		pohjapinta-ala		3,4784		leveys	1,6		tilavuus	2,84	m3											
			0,3 N/m2						0,4 N/m2						0,9 N/m2							
			0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s		0,1 m/s		0,2 m/s		0,4 m/s			
	aika	vaik.alue	vaik.aika	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	Er.nop.	Eroosio	
	[s]	[m2]	[s]	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	g/s	g	
	lasku	10	6,4	5	4,59	146,88	4,59	146,88	4,59	146,88	3,32	106,24	3,32	106,24	3,32	106,24	1,2	38,40	1,2	38,40	1,2	38,40
	täyttö	20	3,4784	10	0	0,00	0,78	27,13	4,62	160,70	0	0,00	0,46	16,00	3,34	116,18	0	0,00	0	0,00	1,21	42,09
	nosto	10	9,8784	5	4,59	226,71	4,59	226,71	4,59	226,71	3,32	163,98	3,32	163,98	3,32	163,98	1,2	59,27	1,2	59,27	1,2	59,27
	<b>yhhteensä</b>	<b>40</b>				<b>373,59</b>		<b>400,72</b>		<b>534,29</b>		<b>270,22</b>		<b>286,22</b>		<b>386,40</b>		<b>97,67</b>		<b>97,67</b>		<b>139,76</b>





Tekijä(t) Laasonen, Juha			
Nimeke <b>Saastuneiden sedimenttien käsittelymahdollisuudet Kymijoessa ja kenttäkokeiden suunnittelu</b>			
Tiivistelmä 1990-luvun alkupuolella havaittiin Kymijoen sedimenttien sisältävän suuria pitoisuuksia organoklooriyhdisteitä, erityisesti myrkyllisiä PCDD- ja PCDF-yhdisteitä (dioksiini- ja furaaniyhdisteitä). Pohjaeläimissä havaittiin kehitysvaurioita. Kymijoen pohjasedimentissä PCDD- ja PCDF-yhdisteiden kokonaismäärän on arvioitu olevan 4 000–5 000 kg, joka jakautuu likimain tasan Kuusankoski–Keltti-välin, Kymijoen alaosan ja merialueen kesken. Lisäksi Kuusankosken ja Keltin välillä elohopeapitoisuudet ylittävät saastuneen maan raja-arvon 5 mg/kg. Tulva-aukkojen juoksutukset aiheuttavat eroosiota Kuusankosken voimalaitoksen alapuolella. Eroosion suuruuden ja laajuuden selvittäminen edellyttää hydrologisia ja numeerisia virtausmallilaskentoja yhdessä vesivoimakoineistojen käyttöhäiriötarkastelujen kanssa. Ruoppaajatarkasteluissa valittiin Kymijoen sedimenttinäytteiden perusteella kolme raekokoa, $d_{50}$ : 20, 60 ja 110 $\mu\text{m}$ . Partikkelin halkaisijan perusteella valitulla leikkausjännitysalueella (0,3–0,9 $\text{N/m}^2$ ) kriittinen virtausnopeus tulee olemaan 0,2–0,4 m/s. Ruoppaukseen aiheuttama kiintoaineen vapautuminen arvioitiin laitteiden työkiertojen perusteella ja sen laskeminen voidaan jakaa seuraaviin osatarkasteluihin: <ul style="list-style-type: none"> <li>• kauhauksen laskeutumiseen perustuva kiintoaineen irtoaminen</li> <li>• kauhauksen ollessa pohjalla pilarin eroosiotarkastelun perusteella</li> <li>• kauhauksen nostosta aiheutuva kiintoaineen irtoaminen uoman pohjasta</li> <li>• avoimesta kauhasta tapahtuva ruoppausmassojen karkaaminen.</li> </ul> Suljetulla kahmarikauhalla ja pumppukauhalla liettyvät pienimmät kiintoainemäärät ruopattua $\text{m}^3$ :ä kohti. Virtausnopeuden ollessa suurempi kuin 0,2 m/s irtoavan kiintoaineen määrä alkaa kasvaa voimakkaasti. Kauhauksen nopeudella on suuri vaikutus vapautuvan kiintoaineksen määrään. Teoreettisen tarkastelun perusteella lasketut vapautuvat kiintoainepitoisuudet ovat pienempiä (max. 20–45 mg/l) kuin kirjallisuudessa esitetyt. Tarkastelun perusteella voidaan kuitenkin päätellä ruoppausmenetelmien keskinäinen paremmuus. Teoreettisen tarkastelun perusteita voidaan tarkentaa tuulitunnelissa tehtävillä kokeilla. Kuusankosken ja Keltin saastuneiden sedimenttien ruoppauksessa (140 000 $\text{m}^3$ ) kiintoainetta on arvioitu liettyvän 5–10 tonnia pumppukauhua ja suljettua kahmarikauhua käyttäen, noin 30 tonnia suljettua kuokkakauhua käyttäen ja noin 40 tonnia avointa kuokkakauhua käyttäen. Yliruoppauksesta johtuen kiintoainemäärät voivat olla moninkertaiset. Keskimääräisten pitoisuuksien perusteella dioksiinia ja furaania vapautuu 0,4–2,8 kg ja elohopeaa noin 40–270 g ruoppaustavasta riippuen. Ruoppaukseen suorituksessa ammattitaidolla on erittäin suuri merkitys kiintoaineen irtoamiseen. Tarpeettoman suurella kaivusyvytydellä löyhdytetään pohjan maa-ainesta, jolloin myös irtoavan kiintoaineksen määrä kasvaa. Esimerkiksi 5 cm:n ylikavulla saadaan kiintoainemäärän lisäykseksi 40–50 g/s, joka on 4–5-kertainen teoreettisesti arvioituihin verrattuna. Toisaalta kauhauksen kaivuvastus suuren vesipitoisuuden omaavassa sedimentissä on pieni, mikä vaikuttaa ruoppaukseen tarkkuuteen. Lisäksi Kymijoella uitetut pohjaan painuneet tukit saattavat aiheuttaa ikävän yllätyksen kiintoaineen irtoamisen suhteen. Jos laajamittaiseen saastuneiden sedimenttien ruoppaamiseen päädytään, on ruoppaus työ suoritettava syksyllä pienten virtaamien aikaan.			
Avainsanat contaminated sediments, sediment treatment, dredging, fluvial environment, sediment transport, remediation, hydraulic engineering, rivers, field experiments			
Toimintayksikkö VTT Valmistustekniikka, Laiva- ja konetekniikka, Tekniikantie 12, PL 1705, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5022-6 (nid) 951-38-5025-0 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Projektinumero V9SU01018	
Julkaisu-aika Syyskuu 2000	Kieli suomi	Sivuja 115 s. + liitt. 4 s.	Hinta C
Projektin nimi PoisonSoil		Toimeksiantaja(t) Suomen ympäristökeskus	
Avainnimeke ja ISSN VTT Julkaisuja – Publikationer 1235-0613 (nid.) 1455-0857 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

