

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

MAANMITTAUS- JA RAKENNUS-  
TEKNIIKAN OSASTO

Kari Vaitomaa

SAHAJAUHON SOVELTUVUUS SALAOJAPUTKEN  
YMPÄRYSAINEEKSI JA OKRASAOSTUMIEN  
EHKÄISYYN

Diplomityö, joka on tehty  
opinnäytteeksi Teknillisen  
korkeakoulun maanmittaus-  
ja rakennustekniikan osas-  
tolla vs. professori Juhani  
Kettusen valvonnassa vuonna  
1988

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratoriossa. Sitä ovat rahoittaneet Salaojituksen tukisäätiö ja Maa- ja vesitekniikan tuki ry. Wiik & Höglund Oy Ab lahjoitti laboratorionkokeisiin tarvittavat salaojaputket. Taloudellisesta tuesta esitän parhaat kiitokseni.

Diplomityön alullepanijana oli professori Pertti Vakkilainen ja valvojana toimi vs. professori Juhani Kettunen, joille esitän kiitokseni. Lisäksi kiitän kaikkia niitä henkilöitä, jotka ovat edesauttaneet työni valmistumista, erityisesti diplomi-insinööri Keijo Lindbergiä, laborantti Aino Peltolaa, diplomi-insinööri Seija Virtasta, diplomi-insinööri Jarmo Vääriskoskea ja tekn. yo. Ismo Tiaista.

Helsingissä tammikuussa 1988

*Kari Vaitomaa*

Kari Vaitomaa

**Tekijä:** Kari Vaitomaa  
**Diplomityö:** Sahajauhon soveltuvuus salaojaputken  
ympäryksaineeksi ja okrasaostumien ehkäisyyn

**Päivämäärä:** 18.01.1988

**Sivumäärä:** 57

**Professuuri:** Vesitalous

**Koodi:** 7.25

**Valvoja:** vs. professori Juhani Kettunen

**Ohjaaja:**

Työn tarkoituksena oli tutkia sahajauhon toimivuutta salaojaputken ympäryksaineena eri maalajeilla. Lisäksi tutkittiin sen taloudellisuutta ja kykyä ehkäistä okrasaostumia salaojaputkissa.

Työ jakautui kirjalliseen ja kokeelliseen osaan. Kirjallisessa osassa selvitettiin sahajauhosta ja muista ympäryksaineista aikaisemmin saatuja kokemuksia ja tutkimustuloksia eri puolilla maailmaa. Kokeellista osaa varten rakennettiin koelaitteisto, jolla selvitettiin sahajauholla esipäälystetyn salaojaputken ominaisuuksia.

Ruotsissa ja Norjassa sahajauhosta saadut kokemukset ovat olleet hyviä. Sahajauho estää hyvin putken lieteytymistä, mutta sen vedenjohtokyky ei ole yhtä hyvä kuin esimerkiksi soran. Sahajauho estää okrasaostumien muodostumista, sillä se sisältää parkkiainetta, joka muodostaa raudan kanssa liukoisia kompleksiyhdisteitä. Sahajauho lahoaa maassa ollessaan. 20 vuoden kuluttua sahajauhon määrästä on jäljellä noin puolet.

Suoritetuissa laboratoriokokeissa sahajauhon todettiin toimivan erittäin hyvin karkeassa hiedassa ja hiesussa sekä tyydyttävästi hietaisessa hiesussa. Sahajauhon kyvystä estää okrasaostumia ei saatu kokeellisia tuloksia. Tämä johtui luultavasti kokeen lyhyestä kestosta.

Tutkimuksen mukaan sahajauho on tulevaisuudessa varteenotettava vaihtoehto soralle. Varsinkin Pohjanmaalla sen käyttö jo lähitulevaisuudessa tulee olemaan soran käyttöä edullisempaa. Pohjanmaalle sahajauho soveltuu hyvin myös okrasaostumavaaran takia.

**Author:** Kari Vaitomaa

**Thesis:** Sawdust as an envelope material in the submerged drainage

**Date:** 18.01.1988

**Number of pages:** 57

**Professorship:** Hydrology and Water  
Resources Engineering

**Code:** 7.25

**Supervisor:** Prof. (act.) Juhani Kettunen

**Instructor:**

The aim of this study was to find out how sawdust works as an envelope material in different types of soil and if it prevents ochre formation.

The research was divided into literature part and into experimental part. The results of the laboratory tests and experiences in the practise all over the world have been discussed in the literature part. The experimental part in the laboratory was carried out to evaluate sawdust's suitability for Finnish conditions.

In Sweden and Norway the experiences in using sawdust as an envelope material have been encouraging. Sawdust prevents the silting of the pipe very effectively but it's hydraulic conductivity is not as good as for example gravel's. Sawdust contains tannins which complex iron and keep it in solution. Sawdust decomposes in the soil and after 20 years approximately 50 % has disintegrated.

In the laboratory test sawdust worked well in sandy loam and in silt loam and satisfactorily in loamy silt. The experiment to evaluate sawdust's ability to prevent ochre formation was also carried out in the laboratory but no information was obtained. The reason for this was probably the short duration of the test (3.5 months).

In the near future the use of sawdust will probably be cheaper than the use of gravel especially in the coastal area of Northern Finland. In this part of Finland ochre causes failures in the drainage and also for this reason sawdust is suitable for this area.

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVALUETTELO

TAULUKKOLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. YMPÄRYSAINHEET	2
2.1 Ympärysaineet salaojituksessa	2
2.2 Ympärysaineille asetettavat vaatimukset	2
2.21 Vedenjohtavuus	2
2.22 Suodatuskyky	5
2.22.1 Yleistä	5
2.22.2 Suodatusteho	6
2.22.3 Pidättymismekanismi	8
2.23 Salaojaputken suojaaminen	9
2.3 Käytössä olevat ympärysaineet	9
2.31 Ympärysaineiden jako	9
2.32 Sora	10
2.33 Sahajauho	11
2.34 Kookoskuitu	13
2.35 Synteettiset materiaalit	15
2.4 Taloudelliset näkökohdat	16
3. TEOREETTINEN TARKASTELU SALAOJAPUTKEN JA SEN YMPÄRYSAINEEEN TOIMINNASTA	19
3.1 Maapartikkelien kulkeutuminen salaojaputkeen	19
3.2 Ideaaliputken hydraulinen gradientti	20
3.3 Todellisen putken hydraulinen gradientti	23
3.4 Ympärysaineella ympäröidyn ideaaliputken hydraulinen gradientti	25
3.5 Ympärysaineella ympäröidyn todellisen putken hydraulinen gradientti	27

	Sivu
4. SAHAJAUHO YMPÄRYSAINEENA	28
4.1 Virtausmekaaniset ominaisuudet	28
4.2 Sahajauhon kyky estää okrasaostumia	33
4.21 Yleistä okrasaostumista	33
4.22 Okrasaostumien synty	35
4.23 Sahajauhon vaikutus okrasaostumiin	37
4.3 Toimintaikä	42
5. LABORATORIOKOKKEET	44
5.1 Koejärjestelyt	44
5.2 Analyysimenetelmät	46
5.3 Laboratoriokokeiden tulokset	47
5.4 Tulosten tarkastelu	50
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	52
KIRJALLISUUSLUETTELO	53

KUVALUETTELO	Sivu
Kuva 1. Sisääntulovastuksen, tehollisen säteen ja ympäryksineen paksuuden välinen riippuvuus putkella, jossa on 8 riviä 1 mm:n reikiä.	4
Kuva 2. Vedenpinnan korkeus ympäryksineen pienissä ja suurissa huokosissa.	6
Kuva 3. Radiaalivirtaus kohti ideaaliputkea.	21
Kuva 4. Radiaalisen vastuksen riippuvuus suhteesta $R/R_0$ .	22
Kuva 5. Painehäviö ja hydraulinen gradientti radiaalisessa virtauksessa ideaaliputkeen.	22
Kuva 6. Virtaus- ja potentiaaliviivat muoviputkeen, jossa reiät ovat neljässä rivissä.	23
Kuva 7. Ympäryksineen vaikutus virtausviivoihin.	26
Kuva 8. Ympäryksineen vaikutus painehäviöön ja hydrauliseen gradienttiin ideaaliputken tapauksessa	27
Kuva 9. Ympäryksineiden huokoskokojakautumia lukusuuskäyränä.	29
Kuva 10. Ympäryksineiden huokoskokojakautumia summakäyränä.	30
Kuva 11. Ympäryksineiden vedenläpäisevyyden riippuvuus kuormituksesta laboratoriokokeessa.	30

	Sivu
Kuva 12. Huippuvaluma ja putkiin kertynyt liete hiesu-hietamaassa vuosina 1976-81 suoritetussa kenttäkokeessa.	31
Kuva 13. Huippuvaluma turvemaalla vuosina 1976-81 suoritetussa kenttäkokeessa.	32
Kuva 14. Sisääntulovastus ja tukkeutumattomien putkireikien määrä neljän vuoden jälkeen Calhornin koepellolla.	39
Kuva 15. Rauta-fenantroliini kompleksiyhdiste.	40
Kuva 16. Eri ympäryksaineiden fenolipitoisuuksia ajan funktiona.	41
Kuva 17. Ferroraudan pitoisuus salaojasta purkautuvassa vedessä tammen sahajauhoa ja eri tanniinipitoisuuksia sisältäviä Antoc-ympäryksaineita käytettäessä.	42
Kuva 18. Koeallas sahajauhon tutkimiseksi eri maalajeilla laboratorio-olosuhteissa.	45
Kuva 19. Laboratoriokokeessa käytettyjen maalajien rakeisuuskäyrät.	45
Kuva 20. Laboratoriokokeessa käytetyn ympäryksaine-soran rakeisuuskäyrä.	46



TAULUKKOLUETTELO	Sivu
Taulukko 1. Valuma sekä putkeen eri ympärysaineilla kertynyt hienoaines laboratoriokokeessa.	32
Taulukko 2. Pohjaveden hydrostaattinen paine eri ympärysaineilla.	38
Taulukko 3. Okran määrä ja koostumus eri ympärysaineilla ympäröidyissä putkissa.	38
Taulukko 4. Eri ympärysaineilla ympäröidyistä putkista virranneen veden pitoisuuksia.	39
Taulukko 5. Tanniinia sisältävien ympärysaineiden fenolipitoisuudet ja kemiallisen hapenkulutuksen arvot.	40
Taulukko 6. Virtaamat eri maalajeilla sahajauholla esipäällystetyistä salaojaputkista laboratoriokokeessa.	48
Taulukko 7. Putkeen kertyneen ja putkesta veden mukana virranneen lietteen määrä sahajauholla esipäällystetystä salaojaputkesta laboratoriokokeessa.	49
Taulukko 8. Sadeveden pH, redox-potentiaali ja kokonaisrauta ennen ja jälkeen ensimmäisen kierrätyskerran laboratoriokokeessa.	50

## 1. JOHDANTO

Salaojaputken ympärillä käytetään miltei aina jonkinlaista ympäryksainetta. Ympäryksaineen tehtävänä on suojata putkea asennuksen aikana, helpottaa veden ja estää tukkeuttavien maapartikkelien pääsy putkeen. Suomessa ympäryksaineena käytetään miltei poikkeuksetta soraa. Muualla maailmassa käytettyjä ympäryksaineita ovat esimerkiksi sahajauho, kookskuitu ja erilaiset synteettiset materiaalit.

Kunnollisen salaojitussoran vaikeutunut saatavuus ja sen hinnan nousu ovat kuitenkin viime aikoina aiheuttaneet painetta uusien ympäryksainemateriaalien löytämiseksi. Tämän suuntaista tutkimustyötä tehdään kaiken aikaa eri puolilla maailmaa.

Eräs mahdollinen, soran korvaava, ympäryksainemateriaali on sahajauho, jota Suomessa on runsaasti tarjolla. Norjassa ja Ruotsissa saadut hyvät kokemukset ovat lisänneet kiinnostusta sahajauhoa kohtaan myös Suomessa. Sahajauhon etuna soraan verrattuna pidetään sen kykyä estää rauta- eli okrasaostumien muodostumista. Tällä on suuri merkitys erityisesti Suomessa, sillä vuosittain suoritettavasta salaojituksesta yhä suurempi osa tapahtuu Keski- ja Pohjois-Suomen hieta- ja turvemaidilla, joilla okrasaostumat heikentävät salaojituksen toimivuutta.

Tässä työssä on tarkasteltu sahajauhon ominaisuuksia, muualla maailmassa saatuja käytännön kokemuksia sekä laboratoriotuloksia saatuja tuloksia. Sahajauhon tutkimiseksi Suomen olosuhteissa rakennettiin koelaitteisto, jolla selvitettiin sen soveltuvuutta eri maalajeille sekä sen kykyä ehkäistä okrasaostumien syntyä.

## 2. YMPÄRYSAINHEET

### 2.1 Ympärysaineet salaojituksessa

Salaojitustietouden lisääntyessä ja tekniikan kehittyessä markkinoille tulee jatkuvasti uusia ympärysainemateriaaleja. Kuitenkin ympärysaineelle asetetut vaatimukset ovat pysyneet entisinä. Ympärysaineen on estettävä tukkeuttavien maahiukkasten pääsy salaojaputkeen, putkirakoihin ja reikiin, sekä itse ympärysaineeseen. Sen pitää vähentää veden virtausvastusta maasta putkeen. Sillä voidaan suojata putkea mekaaniselta rasitukselta ja varmistaa putken paikallaan pysyminen asennuksen aikana. Lisäksi ympärysaineella voidaan estää okrasaostumien muodostumista.

Salaojituksen alkuvaiheissa putkien saumakohtat suositeltiin suojattaviksi sammalilla tai ruohoturpeilla (Strandman, 1978). Näin suojatut putket kehoitettiin tiiviitä maita ojitettaessa ympäröimään sivuilta ja päältä sorakerroksella. Sammalten käytöstä luovuttiin vähitellen ja 1900-luvun alussa putkisto suojattiin 200-300 mm vahvuisella ojan seinämästä pudotetulla hienomaakerroksella tai ruokamullalla. Tiiviissä savimaissa putkisto peitettiin 150-200 mm paksulla sorakerroksella ja juoksuhiessä sekä savessa se ympäröitiin soralla.

Nykyisin yleisin Suomessa käytetty ympärysaine on sora, mutta muoviputkien käytön yleistyessä myös muita ympärysaineita on tullut markkinoille.

### 2.2 Ympärysaineille asetettavat vaatimukset

#### 2.21 Vedenjohtavuus

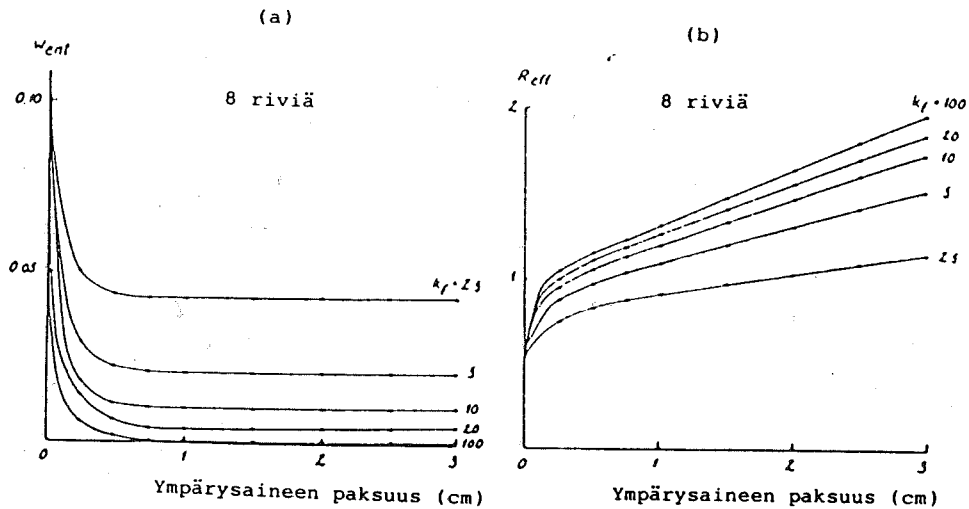
Ympärysaineen hydraulisen johtavuuden tulee olla useita kertoja salaojaputkea ympäröivän maan hydraulista johtavuutta suurempi, jotta putken sisään virtaavaan veteen

vaikuttaisi mahdollisimman pieni sisääntulovastus (Knops & Dierickx, 1979). Nieuwenhuisin ja Wesselingin (1979) mukaan ympärysaineen hydraulinen johtavuus on riittävä, jos se on noin 20 kertaa suurempi kuin ympäröivän maan hydraulinen johtavuus. Eggelsmann (1978) on tullut siihen johtopäätökseen, että riittää, mikäli ympärysaineen hydraulinen johtavuus on vähintään 10 kertaa suurempi kuin maan (Jonsson, 1985).

Sisääntulohäviön suuruus johtuu virtauksen taipumisesta kohti salaojaputkessa olevia reikiä sekä vastuksesta, joka aiheutuu veden virratessa reikien läpi putkeen. Näinollen se riippuu reikien muodosta, koosta, lukumäärästä, sekä niiden sijainnista putkessa. On kuitenkin osoittautunut, että vettä hyvin johtavilla ympärysaineilla reikien lukumäärän ja sijainnin merkitys pienenee. Jopa ohuet, hyvin vettä johtavat ympärysaineet pienentävät sisääntulovastusta edellyttäen, että niiden lujuus estää niiden painumisen putkirakoihin (Jonsson, 1985).

Sisääntulovastuksen suuruuteen ympärysaineen osalta vaikuttaa eniten ympärysaineen paksuus (Jonsson, 1985). Nieuwenhuis ja Wesseling (1979) sekä Dierickx (1980) ovat tutkineet asiaa numeerisesti käyttäen elektrolyyttistä analogiamallia. Kuva 1 esittää Nieuwenhuisin ja Wesselingin saamia tuloksia. Kuvassa tehollisella säteellä tarkoitetaan sellaisen ideaaliputken sädettä, jonka kokonaishäviöt ovat samat kuin todellisella, suurempisäteisellä putkella. Ideaaliputkella tarkoitetaan putkea, johon vesi pääsee vapaasti mistä tahansa kohdasta putkea. Kuva 1 a. osoittaa sisääntulovastuksen riippuvuuden ympärysaineen paksuudesta ja sen hydraulisesta johtavuudesta. Jos ympärysaineen paksuus on 0.50 ja 0.75 cm välillä ja sen hydraulinen johtavuus on 20 kertaa suurempi kuin maan, pienenee sisääntulovastus huomattavasti. Ympärysaineen paksuuden tai hydraulisen johtavuuden lisäyksellä ei tämän jälkeen ole kovinkaan suurta merkitystä. Sama tendenssi havaitaan kuvassa 1 b, joka osoittaa miten putken tehollinen säde riippuu ympärys-

aineen paksuudesta ja hydraulisesta johtavuudesta. Tehollinen säde kasvaa ympäräysaineen paksuuden kasvaessa (Jonsson, 1985).



Kuva 1. Sisääntulovastuksen ( $W_{ent}$ ), tehollisen säteen ( $R_{eff}$ ) ja ympäräysaineen paksuuden välinen riippuvuus putkella, jossa on 8 riviä 1 mm reikiä.  $k_f$  ilmaisee ympäräysaineen ja maan hydraulisten johtavuuksien suhdetta (Nieuwenhuis & Wesseling, 1979).

Ympäräysaineen suuri hydraulinen johtavuus pienentää hydraulista gradienttia ja tämän seurauksena riskiä, että maapartikkelit kulkevat putkea kohti ja itse putkeen. Pienet maapartikkelit voivat tukkia ympäräysaineen. Ympäräysaineen tukkeutuminen ja sen aiheuttama vedenjohtokyvyn pieneminen riippuvat ympäräysaineen huokoskoosta, ympäräysaineen paksuudesta, maapartikkelien koosta ja siitä, miten suurta hydraulista gradienttia ympäröiva maa kestää. Tämän johdosta on tärkeätä tutkia ympäräysaineen tukkeutumista, sen vaikutusta ympäräysaineen vedenjohtokykyyn sekä ympäröivän maan hydraulisen gradientin sietokykyä (Knops, Dierickx, 1979).

Ympäräysaineen vedenjohtokyky voi pienentyä, mikäli ympäräysaine turpoaa jouduttuaan veden kanssa kosketuksiin, tai

mikäli ympäräysaine painuu kasaan yläpuolella olevan maan painosta (Jonsson, 1985).

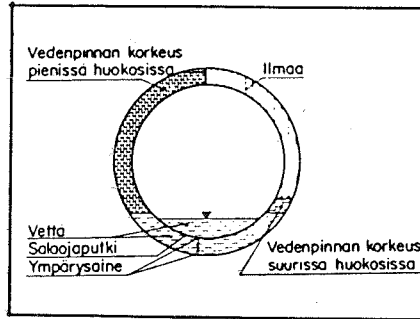
## 2.22 Suodatuskyky

### 2.22.1 Yleistä

Suodattimen tulee estää maahiukkasten pääsy putkeen niin, ettei putki liety umpeen. Lisäksi sen tulee olla valikoiva. Toisin sanoen sen täytyy läpäistä sellaiset maahiukkaset, jotka ovat kyllin pieniä virratakseen veden mukana eivätkä näin aiheuta liettymistä. Liettymisen kannalta vaarallisimpia ovat maa-ainekset välillä 0.05-1.15 mm. Pienemmät hiukkaset kulkeutuvat veden mukana putkesta pois ja suuremmat eivät enää lähde liikkeelle niillä vedennopeuksilla, jotka salaojaputken ympärillä esiintyvät. Pienten hiukkasten poiskulkeutuminen on tärkeää, koska suodatin muuten tulee läpäisemättömäksi (Saavalainen, 1980).

Ympäräysaineen kykyä pienentää putken ympärillä esiintyviä vedennopeuksia niin, että liettymistä aiheuttavat hiukkaset eivät lähde liikkeelle veden mukana, kutsutaan ympäräysaineen hydrauliseksi suodatusvaikutukseksi. Hydraulinen suodatusvaikutus perustuu osaksi siihen, että vesi kohoaa ympäräysaineen huokosissa. Vastaava ilmiö havaitaan maaperässä kapillaarisena vedennousuna. Se on sitä voimakkaampaa mitä pienempiä huokoset ovat. Vedellä kyllästynyt vyöhyke ympäräysaineessa nousee siten huokoskoosta riippuvalle korkeudelle putken vedenpinnan yläpuolelle (kuva 2). Veden virratessa maasta ympäräysaineeseen ja edelleen sen kyllästyneeseen osaan vedennopeus koko ajan hidastuu. Tällöin yhä pienemmät maahiukkaset voivat laskeutua jo ennen putkea, jolloin ympäräysaine täyttää tehtävänsä. Hydraulisesti toimivan suodattimen huokosten tulee siten olla riittävän pieniä, jotta kyllästynyt vyöhyke olisi suuri ja hiukkasilta mahdollisuus laskeutua suodattimessa. Toisaalta niiden

pitää olla niin suuria, ettei veden liikkuminen esty haitallisesti (Suortti-Suominen, 1982).



KUVA 2. Vedenpinnan korkeus ympäräysaineen pienissä ja suurissa huokosissa (Burghardt, 1977).

Salaojaputken liettyminen riippuu maalajista sekä salaojittustyön aikaisista maan kosteusolosuhteista. Liettymisriski on aina suurin välittömästi salaojittustyön jälkeen, sillä putkea ympäröivä maa on tällöin epästabiili. Useimmissa tapauksissa maa pian kuitenkin stabiloituu ja liettymisriski pienenee. Kaikilla maalajeilla näin ei kuitenkaan tapahdu. Esimerkiksi karkealla hiedalla maa jää pysyvästi epästabiiliksi. Tämän vuoksi on tärkeää, että ympäräysaine putken ympärillä toimii kunnolla, sillä salaojaputken toiminta riippuu täysin siitä (Ericson, 1981).

#### 2.22.2 Suodatusteho

Jarret ja Fisher (1984) jakavat ympäräysaineen tukkeutumisen kahteen osaan, jotka ovat:

1. Ympäräysaineen ja maan rajapinnassa tapahtuva, ympäräysaineen aukot tukkiva ja virtausvastusta lisäävä maahiukkasten keräytyminen (blocking). Sen vaikutus huomataan välittömästi.

2. Ajan myötä tapahtuva pienten maapartikkelien, orgaanisen pölyn ja kemiallisten saostumien keräytyminen ympärysaineeseen (clogging).

Blocking-riskiä ei ole, jos pätee epäyhtälö:

$$i(g) \leq i(s)$$

missä:

$i(s)$  = ympäröivän maan hydraulinen gradientti

$i(g)$  = hydraulinen gradientti putken välittömässä läheisyydessä

Clogging-riskiä voidaan arvioida ympärysaineen ja maan hydraulisten johtavuuksien suhteen avulla. Arvon lisääntyminen osoittaa muutosta parempaan, kun taas sen pieneneminen merkitsee ympärysaineen tukkeutumista.

Ympärysaineen suodatuskyky (SRA=sediment retention ability) voidaan määrittellä seuraavasti (Jarret & Fisher, 1984):

$$SRA = ((C(\text{inflow}) - C(\text{outflow})) / C(\text{inflow})) * 100\%$$

missä:

$C(\text{inflow})$  = maahiukkaskonsentraatio ympärysaineeseen tulevassa vedessä

$C(\text{outflow})$  = maahiukkaskonsentraatio ympärysaineen läpäisessä vedessä

Ympärysaineen vedenläpäisevyys (UFR, unit flow rate) määritellään vesimääränä, joka aikayksikössä läpäisee tietyn pinta-alayksikön. Maahiukkasten pidäytyminen ympärysaineeseen alentaa sen vedenläpäisevyyttä. Käytännössä onkin löydettävä kompromissi suodatuskyvyn ja vedenläpäisevyyden välillä. Jotta eri ympärysaineita voitaisiin vertailla keskenään, on pystyttävä yhdistämään vedenläpäisevyyden ja suodatuskyvyn arvot. Tämä onnistuu määrittelemällä suodatustehon (SRE, sediment retention efficiency) arvo (Jarret & Fisher, 1984).



$$\begin{aligned} \text{SRE} &= \text{SRA(m)} * (\text{UFR(fw)}/100) (\text{UFR(m)}/\text{UFR(fw)}) \\ &= \text{SRA(m)} * (\text{UFR(m)}/100) \end{aligned}$$

SRA(m) = mitattujen SRA-arvojen keskiarvo

UFR(fw) = UFR-arvo puhtaalla vedellä

UFR(m) = mitattujen UFR-arvojen keskiarvo

Yleisesti voidaan sanoa, että korkeat SRE-arvot tarkoittavat hyvää suodatuskykyä ja vedenläpäisevyyttä, ja pienet arvot vastaavasti huonoa suodatuskykyä ja/tai huonoa vedenläpäisevyyttä (Jarret & Fisher, 1984).

### 2.22.3 Pidättymismekanismi

RIL 93 (1973) mukaan voidaan rakeisessa suodatinaineessa tapahtuvaan maahiukkasten pidättymiseen vaikuttavat tekijät jakaa kuuteen ryhmään. Kuituisessa materiaalissa pidättymisen noudattaneet samoja periaatteita.

1. Siivilöityminen, joka on samanlaista kuin siivilöitäessä vettä sihdin läpi.
2. Sieppaus, joka tapahtuu hiukkasen joutuessa virtauksen vaikutuksesta riittävän lähelle rakeen pintaa, johon se tarttuu adheesiovoimien vaikutuksesta. Sieppauksen vaikutetäisyys on hyvin pieni.
3. Diffuusio, jolloin hiukkasen lämpöliike voi tuoda hiukkasen niin lähelle suodatinraetta, että hiukkanen pidättyy pintavoimien vaikutuksesta samaan tapaan kuin sieppauksessa
4. Jatkuvuus voi tuoda maahiukkasen riittävän lähelle suodatinraetta, jolloin pidättymisen tapahtuu. Jatkuvuuden merkitys hiukkasten pidättäjänä suodatinaineeseen on varsin vähäinen.

5. Laskeutumista tapahtuu suodatinrakeiden välissä, jolloin kiintoainesta siirtyy virtausviivalta toiselle ja laskeutuu lopuksi rakeen pinnalle.

6. Hydrodynaamiset syyt vaikuttavat hiukkasten liikerataan tehden sen virtausviivasta poikkeavaksi silloin, kun laminaarivirtaus muuttaa suuntaansa tai nopeuttaan, ja hiukkainen joutuu suodatinrakeen pidätyskyvyn piiriin.

### 2.23 Salaojaputken suojaaminen

Muovisalaojaputken tullessa markkinoille sillä oli huono kestävyys. Ympärysaineen kyvylle suojata putkea asetettiin suuria vaatimuksia. Nykyiset muovisalaojaputket (aallotetut putket) ovat kuitenkin kestävämpiä kuin aikaisemmat. Myös salaojitustekniikka ottaa nykyisin muoviputken erityisvaatimukset huomioon. Tämän johdosta vaatimus, että ympärysaineen on suojattava salaojaputkea, on menettänyt merkitystään. Suojaus tulee kyseeseen vain kivikkoisessa maaperässä, tai paikassa, jossa esimerkiksi liikenne voi aiheuttaa putkivaurioita (Ericson, 1981).

## 2.3 Käytössä olevat ympärysaineet

### 2.31 Ympärysaineiden jako

Kansainvälisesti on käytössä monenlaisia ympärysaineita, jotka voidaan jaotella monella tavalla toiminnan, mittojen tai valmistusaineen mukaan. Yleisin lienee kuitenkin jako massiivisiin ns. tilaympärysaineisiin ja esipäällysteisiin.

Tilaympärysaineita ovat esimerkiksi sora, sahajauho, hake, turve, olki ja erilaiset keinoaineet (masuunikuona).

Esipäällysteet jaetaan paksuihin (7-10 mm) ja ohuisiin (alle 7 mm) ympärysaineisiin. Paksuja ovat esimerkiksi

kookoskuitu, turve ja sahajauho. Ohuita ovat erilaiset synteettiset materiaalit, jotka tavallisesti ovat joko mattomaisia, huopamaisia tai kudottuja. Raaka-aineena näissä käytetään esimerkiksi polyamidia, polyeteeniä, polyestereitä ja polypropeenia (Vesi- ja ympäristöhallitus, 1987).

Ympärysaineet voitaisiin jakaa myös rakeisiin, orgaanisiin ja synteettisiin.

### 2.32 Sora

Nykyisin Suomessa suojataan kaikki kivennäismaihin asennettavat tiiliputket soralla. Myös muoviputkien yhteydessä sora on yleisin ympärysaine (Strandman, 1978). Tähän on useita syitä, joita on lueteltu seuraavassa.

1. Soralla on hyvät toiminnalliset ominaisuudet. Se suojaa putkia työmaalla, parantaa putkiston vedenjohtokykyä ja toimii hyvänä suodattimena.
2. Sora soveltuu käytettäväksi kaikille maalajeille ja kaikkiin niihin työolosuhteisiin, joissa salaojitus voidaan muutenkin riskittä suorittaa.
3. Soraa on yleensä hyvin saatavana.
4. Sora on kaikin tavoin kestävä ja pitkäikäistä.

Soran käyttökelpoisuutta salaojituksessa lisää myös se, että Suomessa viljellään paljon maalajeja, jotka ovat huonosti vettäläpäiseviä. Esimerkiksi aitosavimailla pintavesien johtaminen salaojaan sorasilmäkkeiden avulla on pellon kuivumisen kannalta välttämätöntä (Suortti-Suominen, 1982).

Peltosalaojituksessa käytettävän ympärysainesoran tulee olla hyvin vettäläpäisevää ja sen raakoostumuksen on oltava 0.2 mm - 20 mm (Strandman, 1978). Sora ei saa sisältää

ruostetta, eikä muitakaan vieraita aineita. Sorakerroksen paksuus putken päällä on yleensä n. 10 cm (Rathmayer, 1971). Tarvittavan soran määrään vaikuttavat myös putkiko-ko, ojan leveys, pohjan muoto sekä ojitettavan maan laatu. Putkien alla käytetään soraa vain silloin, kun alueella esiintyy paineellista pohjavettä (Strandman, 1978).

Ympärysaineeksi soveltuvan soran valitsemiseksi on kehitetty erilaisia ohjeita. Käytännössä ympärysainesora useimmiten otetaan lähimmästä sorakuopasta olipa sen rakeisuus millainen tahansa. Tehdyissä selvityksissä on todettu, että käytössä olevien sorien laatu ei vastaa suodatinteorian perusteella asetettuja vaatimuksia. Kuitenkin liettymisestä aiheutuneet haitat ja toimintahäiriöt ovat melko harvinaisia. Tämä johtunee siitä, että ympärysainesorassa tapahtuu lajittumista (ns. sillanrakennus-ilmiö), jonka ansiosta soran suodatinominaisuudet ikään kuin itsestään paranevat (Saavalainen, 1980).

Sora on hyvä ympärysaine. Sen ainoita haittoja ovat painosta johtuva vaikea käsiteltävyys sekä paikoin myös korkea hinta (Vesi- ja ympäristöhallitus, 1987).

Naapurimaiden kokemusten perusteella näyttää kuitenkin siltä, että soran käyttö ei välttämättä ole ainoa oikea tapa. Kanervisto (1985) arvioi, että kallis salaojasora tulisi käytetyksi tarkoituksenmukaisemmin, jos kauttaaltaan käytettävän sorastuksen asemesta soraa käytettäisiin lähinnä vain pystysuuntaiseen ojitukseen eli sorasilmäkkeiden muodostamiseen pahimmin veden vaivaamiksi tiedettyihin kohtiin.

### 2.33 Sahajauho

Ruotsissa on jo monta vuotta soran lisäksi käytetty salaojaputkien ympärysaineena sahajauhoa. Soran tavoin sahajauho suojaa putkea kolhuilta salaojakaivantoa täytettäes-

sä. Sitä vastoin se ei suojaa putkea painevaurioilta yhtä tehokkaasti kuin sora. Sahajauhon suodatuskyky on erittäin hyvä, mutta sen vedenläpäisykyky on huomattavasti pienempi kuin soran. Tämän johdosta sahajauhossa ei saisi olla liian paljon hienoaainesta (Jonsson, 1985).

Salaojan ympärysaineena käytettävän sahajauhon tulisi olla karkeata, tuoretta, havupuusta sahattua eikä siinä saisi olla paljon kuorta (Vesi- ja ympäristöhallitus, 1987).

Soraan verrattuna sahajauholla on seuraavat ominaisuudet:

1. Se on kevyempää ja näin ollen helpompaa käsitellä työmaalla.
2. Se lahoaa vähitellen, joten sitä täytyy käyttää runsaammin, 15 - 20 cm kerros.
3. Vedenalaisessa ojituksessa sitä ei voi käyttää, koska se muuttuu läpäisemättömäksi massaksi (Vesi- ja ympäristöhallitus, 1987).
4. Sen huokokset ovat pienemmät kuin sorassa olevat, ja sen vuoksi se erityisen hyvin pystyy estämään lietteen muodostumista (Hove, 1982).

Sahajauhon lahoaminen riippuu maalajista, mutta nyökkisääntönä pidetään, että 20 vuoden kuluessa sahajauhosta on lahonnut noin puolet (Hove, 1982). Ruotsissa on kuitenkin havaittu, että sahajauhon lahottuakin on putken ympärille jäänyt suodattimen lailla toimiva kerros. Edellytyksenä kuitenkin on, että sahajauho on karkeaa ja että sitä käytetään runsaasti, vähintään 20 cm putken päälle (Saavalainen, 1980).

Orgaanisilla ympärysaineilla, kuten sahajauholla, on kyky hidastaa tai kokonaan ehkäistä ruostesaostumien syntyä. Tämä perustuu siihen, että ne sisältävät parkkiainetta. Se

muodostaa raudan kanssa suhteellisen pysyviä yhdisteitä ja vähentää liukenemattomassa muodossa olevan raudan määrää (Suortti-Suominen & Mäenpää, 1982).

Orgaanisia ympäryksaineita käytetään yleensä, kun soraa ei ole saatavilla tai kun se on kallista. Suomessa soraesiintymät ovat sen verran yleisiä, että sahajauhon käyttöön ei ole tähän mennessä laajamittaisesti ryhdytty.

Norjassa soraa ei ole yhtä runsaasti kuin Suomessa. Niinpä jo vuosisadan vaihteesta lähtien salaojaputken ympäryksaineena on siellä käytetty sahajauhoa. Nykyään sahajauhon osuus Norjan salaojituksessa on noin 60 % (Hove, 1982). Yhdysvalloissa ja Kanadassa orgaanisten ympäryksaineiden käyttö ei ole yhtä laajamittaista kuin Euroopassa. Syynä on ehkä orgaanisten aineiden epävarma toimintaikä, niiden vaikea käsiteltävyys ja pelko, että niissä tapahtuu kemiallisia tai biologisia reaktioita, jotka aiheuttavat ympäryksaineen tukkeutumista (Knops & Dierickx, 1978).

Sahajauhoa käsitellään tarkemmin luvussa 4.

#### 2.34 Kookoskuitu

Kookoskuitu valmistetaan kookospähkinästä. Sen pääasialliset aineosat ovat selluloosa ja ligniini l. puuaine. Kuiduista valmistetaan suodatinkangasta, joka lukeutuu ns. paksuihin ympäryksaineisiin (paksuus > 7 mm). Kookoskuidut ovat varsin karkeita. Tämän vuoksi kankaan tilavuudesta jopa yli 90 % on huokosia. Pääasiallinen huokoskoko, 0.3 - 1.0 mm, on ulkomailla käytettyjen keinotekkoisten ja eloperäisten ympäryksaineiden suurimpia (Suortti-Suominen, 1982).

Laboratorio-oloissa kookoskuitukankaan vedenläpäisevyys verrattuna moniin muihin keinotekkoisiin ja eloperäisiin ympäryksaineisiin todettiin noin viisinkertaiseksi. Kyseisessä tutkimuksessa ei sora kuitenkaan ollut mukana. Kent-

täkökeissa sahajauho todettiin kookoskankaan kanssa samanveroiseksi. Tämä pätee varsinkin turve- ja savimaalla. Hiesua ja hietaa paljon sisältävässä maassa kookoskankaan vaikutus virtaukseen heikentyi nopeasti, kun taas sahajauhon toiminta pysyi kyseisessä kenttäkokeessa hyvänä (Ericson, 1981).

Suodatusominaisuuksien kannalta on kookoskuitukankaan huokosten suuri koko epäedullinen. Se ei pysty siivilöimään vedestä putkeen laskeutuvia aineksia, joita ovat etupäässä hietahiukkaset (Suortti-Suominen, 1982).

Kookoskuidusta tehty suodatinkangas tuli markkinoille 1970-luvun alussa. Mm. Hollannissa sen käyttö levisi nopeasti. Nykyään suurimmassa osassa Hollannissa suoritettavista salaojituksista käytetään ympärysaineena kookosta (Stuyt & Cestre, 1986). Samoin on asian laita myös Belgiassa ja Länsi-Saksassa. Pohjoismaissa kookoksen käyttö on toistaiseksi ollut vähäistä (Suortti-Suominen 1982).

Kookoskuitu sisältää paljon ligniiniä, joten sen ei pitäisi helposti lahota. Hollannissa on kuitenkin havaittu, että kookos on lahonnut jopa 2 - 3 vuodessa (Ericson, 1981). Seuraavien olosuhteiden todettiin nopeuttavan lahoamista:

1. Korkea pH (yli 6.0)
2. Aerobiset olosuhteet (putki on veden täyttämä vain osan aikaa vuodesta)
3. Kookoksen joutuminen humuspitoisen maan kanssa tekemisiin.

Hollannissa kookosta pidetään kuitenkin luotettavana ympärysainemateriaalina (Stuyt & Cestre, 1986). Tanskassa kookosta suositellaan käytettäväksi vain huonosti vettäläpäisevissä maalajeissa, joissa maarakeiden tunkeutumisesta putkeen ei ole vaaraa (Suortti-Suominen, 1982). Norjassa

kookosympäryrsainetta on tutkittu sekä laboratorioskokein että kenttäkokein. Savimailla liettyminen oli 5 - 6 vuoden kuluttua kokeen aloittamisesta 2 % ja hiesumaalla 32 % putken poikkipinta-alasta. Tämän kokeen perusteella näyttää siltä, että kookoskuitu kelpaa parhaiten turvemaille, mutta kokeet eivät vielä kuitenkaan riitä antamaan varmuutta sen toimivuudesta. Tämän vuoksi valtio ei tue Norjassa kookosympäryrsaineella tehtäviä salaojituksia (Hove, 1983).

### 2.35 Synteettiset materiaalit

Ympäryrsaineeksi sopivien rakeisten ja orgaanisten materiaalien vaikea saatavuus tai täydellinen puuttuminen pakottavat monilla alueilla etsimään niille halpoja korvaavia materiaaleja (Knops & Dierickx, 1979). Tämän johdosta markkinoille on tullut suuri määrä erilaisia synteettisiä ympäryrsaineita.

Synteettiset ympäryrsaineet ovat halpoja ja ne voidaan asentaa putken ympärille jo tehtaalla. Lisäksi niitä on helpompi kuljettaa ja asentaa kuin esimerkiksi soraa (Schwab, 1986). Vaikka orgaanisetkin materiaalit, kuten esimerkiksi sahajauho, esiasennetaan jo valmistusvaiheessa, on synteettisten materiaalien suurimpana etuna orgaanisiin materiaaleihin verrattuna se, että ne eivät maassa ollessaan yleensä hajoa.

Ensimmäiset markkinoille tulleet keinosuodattimet olivat ohuita lasikuituhuopia. Kokemukset niistä eivät kuitenkaan olleet rohkaisevia, ja niiden käyttö onkin jäänyt vähäiseksi Euroopassa (Saavalainen, 1980). Esimerkiksi Norjassa lasikuidusta saatiin 1960-luvulla niin huonoja kokemuksia, että sen käyttö lopetettiin 1969 (Hove, 1982).

Ruotsissa tehtyjen tutkimusten mukaan ohuita suodatinkankaita voidaan käyttää esimerkiksi hieta- ja hiekkamailla, mutta niiden tukkeutumistaipumus estää niiden laajemman



käytön. Suodatinkankaat ovat myös niin ohuita, että ne eivät lisää riittävästi putken vedenottokykyä. Näiden syiden takia ohuita suodatinkankaita käytetään Ruotsissa erittäin vähän (Ericson, 1981).

Toisin kuin Euroopassa Yhdysvalloissa ja Kanadassa käytetään paljon ohuita synteettisiä ympärysainekankaita. Tämä johtuu ehkä siitä, että Yhdysvalloissa ja Kanadassa ympärysaineita käytetään pääasiassa liettymisherkillä, mutta hyvin vettäjohtavilla mailla. Toinen mahdollinen syy on se, että Yhdysvalloissa ja Kanadassa käytetään suurempia putkikokoja kuin Euroopassa. Pienin putkikoko Yhdysvalloissa ja Kanadassa on 100 mm, kun se taas Euroopassa yleensä on 50 mm. Suuremmalla putkella on suurempi vedenottokyky, joten ympärysaineen vedenottokykyä lisäävällä vaikutuksella ei tällöin ole yhtä suurta merkitystä kuin pienempää putkea käytettäessä (Jonsson, 1985).

Kokemukset ohuiden synteettisten kankaiden käytöstä alueilla, joilla on vaaraa okrasaostumista, ovat olleet huonoja. Ympärysaineena oleva kangas on tukkeutunut hyvin nopeasti, ja sitä on huuhtelun avulla vaikea saada uudelleen toimintakykyiseksi (Andersen, 1983).

Synteettisten materiaalien haittapuolena on lisäksi se, että ne ovat arkoja ultraviolettisäteilylle. (Willardson, 1978). Tämä aiheuttaa ongelmia erityisesti varastoinnin aikana.

#### 2.4 Taloudelliset näkökohdat

Vallitseva ympärysainemateriaali on Suomessa sora, sillä sitä löytyy meiltä runsaasti. Soran hinta on kuitenkin viime aikoina noussut. Lisäksi korkealuokkaista salaojitus-soraa on yhä vaikeampi saada (Saavalainen, 1986).

Keskimääräiset salaojituskustannukset vuoden 1985 hintatasossa olivat noin 8000 mk hehtaaria kohti. Salaojaputken ja -soran osuus tästä oli 40 %, asennuskustannusten osuus 36 % ja muiden kustannusten osuus 24 %. Salaojituskustannukset ovat viime vuosina nousseet enemmän kuin muut rakennuskustannukset, sillä ojaväliä on pienennetty. Tämä johtuu 1980-luvun alkupuolen sateisista vuosista ja tällöin tapahtuneesta maan tiivistymisestä (Saavalainen, 1986).

Vuonna 1986 oli salaojitussoran keskimääräinen hinta koko valtakunnan alueella 9 mk kuutiometriltä. Kuljetuskustannukset aiheuttavat soran hintaan kuitenkin suuria eroja eri puolilla Suomea (Suortti-Suominen, 1986).

Kalleinta sora oli tilalle toimitettuna itäisen Uudenmaan rannikkoalueella, keskimäärin 43 mk kuutiolta ja maksimissaan 108 mk kuutiolta. Kallein sora oli tosin erikoiskäsiteltyä ja tasarakeiseksi seulottua. Toiseksi kalleinta sora oli Pohjanmaalla, keskimäärin 34 mk kuutiolta ja maksimissaan 55 mk. Halvinta sora oli Kaakkois-Suomessa, 23 mk kuutiolta (Suortti-Suominen, 1986).

Yleisesti ottaen soran hinta vaihteli 10 mk:sta 108 mk:aan kuutiota kohti riippuen sijainnista. Kallein hinta, 108 mk kuutiolta, maksettiin itäisellä Uudellamaalla ja halvin hinta, 10 mk kuutiolta, Salpausselän alueella.

Soran levityksen hinta vuonna 1986 vaihteli 0.5 mk:sta 1.0 mk:aan ojаметriä kohti. Tällöin ei huomioon ole otettu sorasilmäkkeiden aiheuttamia kustannuksia. Jouduttaessa käyttämään kahta soranlevityskonetta oli hinta kaksinkertainen (Perälä, 1987).

Vuoden 1987 hintatasossa aallotetun 40 mm:sen muoviputken hinta oli keskimäärin 2.75 mk/m. Samanlaisen sahajauholla esipäällystetyn putken hinta oli 4.50 mk/m. Myös muiden esipäällystettyjen salaojaputkien hinta oli samaa luokkaa. Esimerkiksi kookoskuidulla esipäällystetyn putken hinta oli

4.40 mk/m, ja polypropeenilla esipäällystetyn putken 4.90 mk/m (Perälä, 1987).

Verrattaessa soran ja sahajauhon aiheuttamia ympärysaine-kustannuksia otettiin seuraavassa soran osalta huomioon sen hinta, kuljetuskustannukset, yhden soranlevityskoneen aiheuttamat levityskustannukset sekä putken hinta. Soramene-kiksi arvioitiin kaksi kuutiota sataa metriä kohti. Saha-jauhopotken osalta otettiin huomioon vain sen hinta. Ne kustannukset, jotka molempia putkia käytettäessä olivat sa-mat, esimerkiksi kaivu- ja asennuskustannukset, jätettiin huomiotta. Näin laskettaessa saatiin sahajauhopotken kus-tannukseksi koko maassa 450 mk / 100 m salaojaa. Käytettä-essä soraa kustannukset sataa metriä kohden vaihtelivat siten, että Kaakkois-Suomessa ne olivat 396 mk, Pohjanmaal-la keskimäärin 418 mk ja maksimissaan 460 mk, ja itäisen Uudenmaan rannikkoalueella keskimäärin 436 mk ja maksimi-sissaan 566 mk. Koko Suomen osalta keskimääräiset kustan-nukset olivat 408 mk.

Irtosahajauhoa käytettäessä saatiin salaojituksen kustan-nuksiksi 430 mk /100 m. Irtosahajauhon hinta tilalle toimi-tettuna oli koko maassa keskimäärin 40 mk kuutiolta (Vuore-la, 1987). Sen meneksi laskettiin 20 l/m (Hove, 1982). Irtosahajauhon levityskustannukset oletettiin soran levi-tyskustannusten suuruisiksi (Vuorela, 1987).

Tämän hintavertailun perusteella näyttää siltä, että soran käyttö on sahajauhon käyttöä edullisempaa Kaakkois-Suomessa kun taas itäisen Uudenmaan rannikkoalueella ja Pohjanmaalla kustannukset ovat suurin piirtein samat. Eräissä tapauksis-sa sahajauhon käyttö nykyisillä hinnoilla on selvästi soran käyttöä edullisempaa. Irtosahajauhon käyttö näyttää olevan hieman valmiiksi ympäröidyn sahajauhopotken käyttöä edulli-sempaa. On kuitenkin otettava huomioon soran hinnan luulta-va nousu tulevaisuudessa, samoin kuin sarjatuotannosta aiheutuva sahajauhopotken hinnan todennäköinen lasku. Li-säksi on muistettava, että kustannusvertailu ei ole ainoa

ympäryksineen valintaperuste. Sahajauhon eduksi voidaan laskea sen kyky estää okrasaostumia. Toisaalta sahajauhon toimintaikä on soran toimintaikää lyhyempi. Myös sillä voi olla merkitystä, että käytettäessä sahajauhoa voidaan salaojittaa myös sellaisena aikana, jolloin pellon huono kantavuus estää raskaiden sorakuormien viemisen pellolle.

### 3. TEOREETTINEN TARKASTELU SALAOJAPUTKEN JA SEN YMPÄRYKSINEEN TOIMINNASTA

Seuraavassa tarkastelussa luku 3.1 perustuu Tiaisen (1987) tekemään kirjallisuustutkimukseen salaojaputken ympäryksineistä. Luvut 3.2, 3.3, 3.4 ja 3.5 perustuvat useisiin Dierckxin (1978, 1980, 1982, 1983 ja 1986) julkaisuihin.

#### 3.1 Maapartikkelien kulkeutuminen salaojaputkeen

Maapartikkelien liike ja maan eroosio ovat riippuvaisia maan leikkauslujuudesta, joka vastustaa maapartikkelien keskinäistä liikettä. Leikkauslujuuden suuruutta kuvaa Coulombin kaava:

$$\tau_f = c + \delta \tan \phi \quad (1)$$

missä

$$\tau_f = \text{leikkauslujuus}$$

$$c = \text{koheesio}$$

$$\delta = \text{leikkauspinnassa vaikuttava normaalijännitys}$$

$$\phi = \text{maan sisäinen kitkakulma}$$

Sisäinen kitka aiheutuu maarakeiden välisestä hankauksesta. Se muodostuu normaalien kitkan tapaan kitkapinnassa vaikuttavan normaalijännityksen ( $\delta$ ) ja kitkakertoimen tulona. Kitkakerroin ilmaistaan kitkakulman tangenttina. Maan sisäisen kitkakulman suuruuteen vaikuttavat maan raakoostumus, rakeiden muoto ja pyöristyneisyys sekä maan tiiviys.

Maarakeiden välisten voimien suuruus riippuu maamassojen kuormituksesta ja maassa olevan veden paineesta. Virratesaan maapartikkelien välisessä huokostilassa vesi aiheuttaa maapartikkeleihin virtauksen suuntaisen voiman, jota kutsutaan virtauspaineeksi. Jos virtauspaine ylittää maan leikkauslujuuden, katoaa maan rakenteellinen lujuus ja eroosio alkaa. Koska virtauspaine on verrannollinen vallitsevaan hydrauliseen gradienttiin, alkaa eroosio hydraulisen gradientin  $i$  saavuttaessa kriittisen arvon  $i_c$ .

Vedellä kyllästetyn, koheesiottoman maan kriittinen hydraulinen gradientti  $i_c$  saadaan yhtälöstä (2):

$$i_c = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w \quad (2)$$

$\rho_s$  = kyllästetyn maan tilavuuspaino,  $\text{kg/m}^3$

$\rho_w$  = veden tilavuuspaino,  $\text{kg/m}^3$

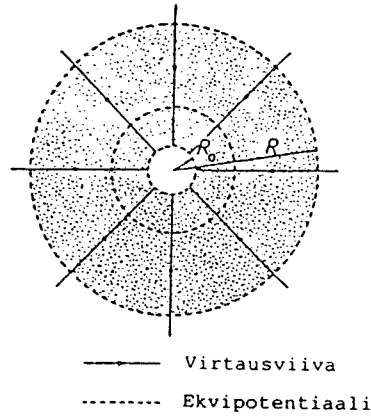
Vastaavasti kyllästetyssä koheesiomaassa maapartikkelien keskinäinen liike alkaa, kun leikkauslujuus menee nolllaan. Tämä edellyttää korkeampaa hydraulista gradienttia kuin koheesiottoman maan tapauksessa.

### 3.2 Ideaaliputken painehäviö ja hydraulinen gradientti

Virtauksen ollessa symmetristä ja radiaalista, voidaan maapartikkelien kulkeutumisherkkyyttä täytenä virtaavaan ideaaliputkeen kuvata hydraulisen gradientin avulla. Symmetrisellä radiaalivirtauksella tarkoitetaan sitä, että virtausviivat ovat säteittäisesti ja symmetrisesti putken ympärillä (kuva 3).

Tarkasteltaessa radiaalista virtausta kohti ideaaliputkea maassa, jonka vedenjohtavuus on vakio, saadaan painehäviö yhtälöstä (3):

$$h_r = (g/2\pi k) \ln(R/R_0) = gW_r \quad (3)$$



KUVA 3. Radiaalivirtaus kohti ideaaliputkea (Dierickx, 1980).

tai

$$W_r = (1/2\pi k) \ln(R/R_0) \quad (4)$$

missä

- $h_r$  = radiaalisen virtauksen painehäviö (m)  
 $g$  = virtaama putken pituusyksikköä kohti ( $m^2/d$ )  
 $k$  = maan hydraulinen johtavuus (m/d)  
 $R$  = ekvipotentiaalin säde (m)  
 $R_0$  = ideaaliputken säde (m)  
 $W_r$  = radiaalinen vastus (d/m)

Radiaalinen vastus riippuu maan hydraulisesta johtavuudesta, ekvipotentiaalin säteestä ja ideaaliputken säteestä. Radiaalinen vastus kasvaa maan hydraulisen johtavuuden ja ideaaliputken säteen pienentyessä. Yhtälö (3) voidaan kirjoittaa muotoon:

$$h_r = (g/k) a_r \quad (5)$$

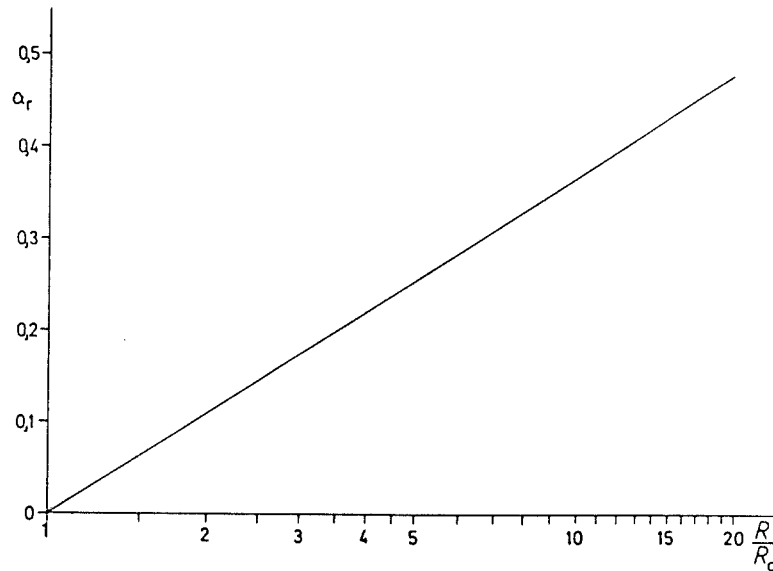
jossa

$$a_r = (1/2\pi) \ln(R/R_0) \quad (6)$$

Yhtälöiden (3) ja (5) perusteella voidaan kirjoittaa:

$$a_r = W_r k \quad (7)$$

jossa  $a_r$  on dimensioton radiaalinen vastus.  $a_r$  pienenee putken säteen kasvaessa (kuva 4).

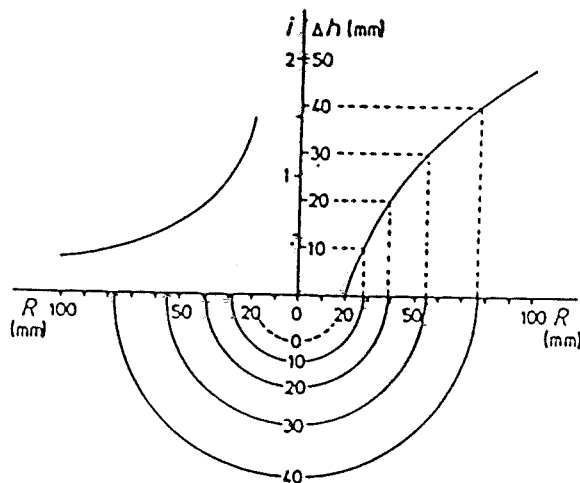


KUVA 4. Radiaalisen vastuksen  $a_r$  riippuvuus suhteesta  $R/R_0$  (Dierickx, 1980).

Yhtälöstä (3) voidaan ratkaista ideaaliputken hydraulinen gradientti:

$$i = dh/dR = g/2\pi kR \quad (8)$$

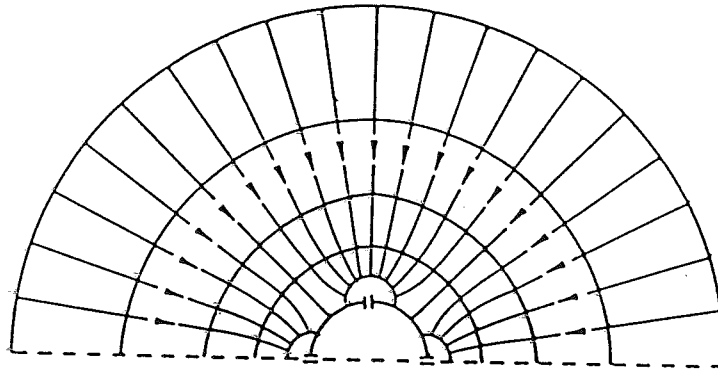
Kuvassa 5 on esitetty hydraulinen gradientti ja painehäviö ideaaliputken kehältä lasketun etäisyyden funktiona.



KUVA 5. Painehäviö  $\Delta h$  ja hydraulinen gradientti radiaalisessa virtauksessa ideaaliputkeen, kun  $R_0 = 20$  mm ja  $g/k = 0.188$  m (Dierickx, 1983).

### 3.3 Todellisen putken painehäviö ja hydraulinen gradientti

Todelliset putket eivät toimi ideaaliputken tavoin vaan vesi pääsee esimerkiksi muoviputkeen vain reikien kautta. Virtausviivojen on näin ollen taivuttava voimakkaasti (kuva 6).



KUVA 6. Virtaus- ja potentiaaliviivat muoviputkeen, jossa reiät ovat 4:ssä rivissä (Saavalainen 1983).

Todellisella putkella radiaalisen virtauksen painehäviön lisäksi on otettava huomioon sisäänvirtauksen painehäviö, joka voidaan esittää seuraavasti:

$$h_e = gW_e = (g/k)a_e \quad (9)$$

eli

$$a_e = W_e k \quad (10)$$

missä

$$h_e = \text{sisäänvirtauksen painehäviö (m)}$$

$$W_e = \text{sisäänvirtausvastus (d/m)}$$

$$a_e = \text{dimensioton sisäänvirtausvastus}$$

Kokonaispainehäviö radiaalivirtauksessa kohti todellista putkea saadaan yhtälöstä (11).

$$h_t = h_r + h_e \quad (11)$$

eli

$$h_t = gW_t = g(W_r + W_e) \quad (12)$$

missä

$$h_t = \text{radiaalisen virtauksen kokonaispainehäviö (m)}$$



$h_e$  = sisäänvirtauksen painehäviö (m)

$h_r$  = radiaalisen virtauksen painehäviö (m)

$W_r$  = radiaalinen vastus (d/m)

$W_e$  = sisäänvirtausvastus (d/m)

Kokonaispainehäviölle saadaan myös seuraavat yhtälöt:

$$h_t = (g/k)a_t = (g/k)(a_r + a_e) \quad (13)$$

ja

$$a_t = a_r + a_e \quad (14)$$

sekä

$$a_t = W_t k \quad (15)$$

missä

$W_t$  = kokonaisvirtausvastus (d/m)

$a_t$ ,  $a_r$  ja  $a_e$  ovat dimensiottomia virtausvastuksia

Kun  $a_r$  yhtälöstä (6) sijoitetaan yhtälöön (14) saadaan:

$$a_t = (1/2\pi) \ln(R/R_0) + a_e \quad (16)$$

Käyttämällä tehollista sädettä saadaan:

$$a_t = (1/2\pi) \ln(R/R_{ef}) \quad (17)$$

missä

$R_{ef}$  = tehollinen säde

Teholliselle säteelle saadaan nyt yhtälö:

$$R_{ef} = R \exp(-2\pi a_t) \quad (18)$$

tai

$$R_{ef} = R_0 \exp(-2\pi a_e) \quad (19)$$

Todellisen putken säde  $R_0$  voidaan siis korvata ideaaliputken säteellä  $R_{ef}$ . Ideaaliputken säde pienenee, kun  $a_e$  kasvaa. Kun  $a_e$  on 0,  $R_{ef} = R_0$ .

Kruijtzerin (1971) mukaan voidaan dimensioton sisääntulovastus salaojaputkelle, jonka raot ovat suorakaiteenmuotoi-

sia, epäjatkuvia ja jotka ovat putken pituussuuntaan nähden poikittaaisia, laskea seuraavasta kaavasta:

$$a_e = (c/2\pi^2 R_0) \ln(2/\pi A_{pp})$$

missä

$$c = \text{putken pituussuunnassa kahden peräkkäisen reiän välimatka (mm)}$$

$$A_{pp} = \text{reikien yhteispinta-ala suhteessa koko putken pinta-alaan (\%)}$$

Kruijtzerin kaavasta lasketun sisääntulovastuksen avulla voidaan laskea salaojaputken tehollinen säde, ja tämän avulla edelleen hydraulinen gradientti yhtälöstä (8).

Teoreettisesti lasketut hydraulisen gradientin arvot ovat todellisia arvoja pienempiä. Tämä johtuu siitä, että teorialat on laadittu ideaaliputkelle oletuksella, että virtaus on täysin radiaalista. Todellisuudessaan virtausviivat joutuvat taipumaan putkirakoja kohti.

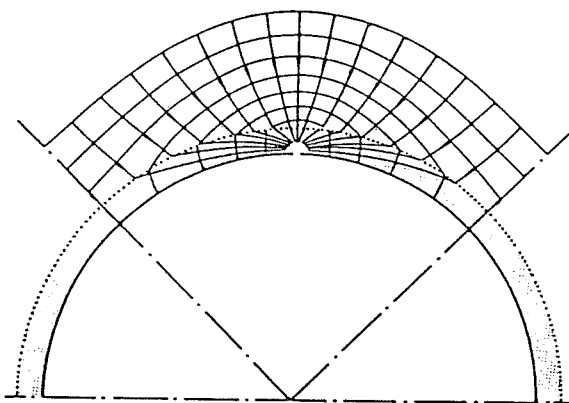
### 3.4 Ympärysaineella ympäröidyn ideaaliputken hydraulinen gradientti

Ympärysaine, jolla on suurempi vedenjohtavuus kuin ympäröivällä maalla, pienentää salaojaputken sisäänvirtausvastusta, ja näin ollen myös hydraulista gradienttia. Ympärysaineen paksuus vaikuttaa putken sisäänvirtausvastukseen siten, että pienenemistä tapahtuu 10 mm:iin saakka. Tämän jälkeen vastus ei enää pienene, vaikka ympärysaineen paksuutta vielä lisättäisiin. Kuvassa 7 on esitetty ympärysaineen vaikutus virtausviivoihin.

Ideaaliputkea kohti virtaavaan veteen kohdistuva radiaalinen vastus maassa saadaan yhtälöstä:

$$a_{rs} = (1/2\pi) \ln (R/R_e) \quad (21)$$

$$R_e = d_e + R_0 \quad (22)$$



KUVA 7. Ympärysaineen vaikutus virtausviivoihin (Saavalainen, 1983).

missä

- $a_{rs}$  = radiaalinen vastus ympäröivässä maassa  
 $R_e$  = ekvipotentiaalilin säde (m)  
 $d_e$  = ympärysaineen paksuus (m)

Radiaalinen vastus ympärysaineessa saadaan yhtälöstä:

$$a'_{re} = (1/2\pi\kappa_e) \ln (R_e/R_0) \quad (23)$$

missä

- $a'_{re}$  = radiaalinen vastus ympärysaineessa  
 $\kappa_e$  = ympärysaineen ja ympäröivän maan  
 vedenjohtavuuksien suhde

Kokonaisvastus ( $a_t$ ) voidaan nyt kirjoittaa muotoon:

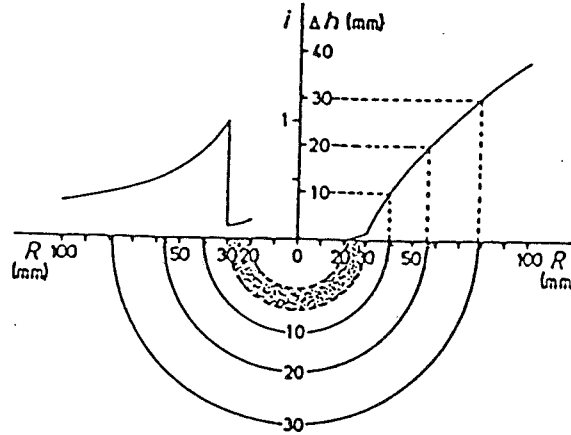
$$a_t = (1/2\pi) \ln (R/R_e) + (1/2\pi\kappa_e) \ln (R_e/R_0) \quad (24)$$

Yhtälöistä (17) ja (24) saadaan tehollinen säde:

$$R_{ef} = R_0^{(1/\kappa_e)} * R_e^{(1-1/\kappa_e)} \quad (25)$$

$R_{ef}$ :n avulla voidaan laskea hydraulinen gradientti yhtälöstä (8).

Ympärysaineen vaikutusta painehäviöön ja hydrauliseen gradienttiin selventää kuva 8.



KUVA 8. Ympärysaineen vaikutus painehäviöön ( $\Delta h$ ) ja hydrauliseen gradienttiin, kun putkena on ideaaliputki, jonka säde  $R_0=20$  mm ja  $g/k=0.188$  m. Ympärysaineen paksuus  $d_e=10$  mm (Dierickx, 1983).

### 3.5 Ympärysaineella ympäröidyn todellisen putken hydraulinen gradientti

Kun salaojaputken ympärille asetetaan ympärysaine, jonka vedenjohtavuus on  $\kappa_e$ , voidaan sisäänvirtausvastus  $a'_e$  laskea yhtälöstä:

$$a'_e = a_e / \kappa_e \quad (26)$$

missä

$a_e$  = dimensioton sisäänvirtausvastus ilman ympärysainetta

$\kappa_e$  = ympärysaineen ja ympäröivän maan vedenjohtavuuksien suhde

Ympärysaineella ympäröidyn todellisen putken dimensioton kokonaisvirtausvastus saadaan nyt lisäämällä ympärysaineella ympäröidyn ideaaliputken kokonaisvirtausvastukseen (yhtälö 24) todellisen putken sisäänvirtausvastus (yhtälö 26):

$$a_t = (1/2\pi) \ln (R/R_e) + (1/2\pi\kappa_e) \ln (R_e/R_0) + a'_e \quad (27)$$

missä

$R_e$  = ympärysaineen ja maan rajapintaan ulottuva säde (m)

Yhtälöistä (17) ja (27) saadaan nyt tehollinen säde:

$$R_{ef} = R_0^{(1/\kappa_e)} * R_e^{(1-1/\kappa_e)} \exp(-2\pi a'_e) \quad (28)$$

Sijoittamalla  $R_{ef}$  yhtälöön (8) saadaan hydraulinen gradientti maan ja ympärysaineen rajapinnassa.

Tavallisesti putki ei ole täynnä vettä eikä virtaus symmetristä. Ekvipotentialit saavuttavat pyöreän muotonsa jollakin etäisyydellä putkesta, mutta niiden keskipisteet sijaitsevat epäkeskisesti putken keskipisteen suhteen. Tällaisessa tilanteessa putken tulevan virtauksen vastus muuttuu. Kuitenkin suurin piirtein sama määrä vettä virtaa putkeen sen alapuolelta. Tällöin hydraulinen gradientti putken alapuolella on paljon suurempi kuin symmetrisen radiaalivirtauksen tapauksessa. Maapartikkelien kulkeutuminen putkeen alkaa putken alapuolelta ja siirtyy ylöspäin, kun vedenpinnan korkeus putkessa nousee (Tiainen, 1987).

#### 4. SAHAJAUHO YMPÄRYSAINEENA

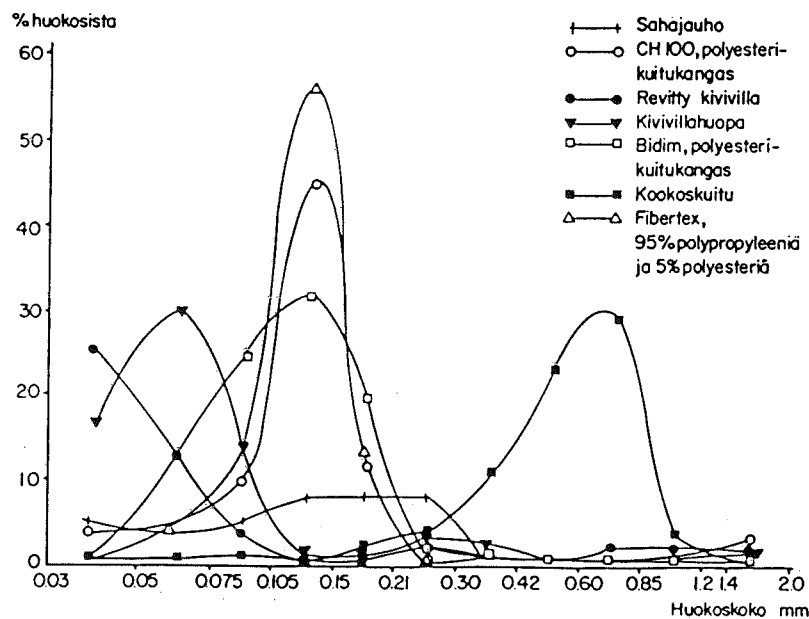
##### 4.1 Virtausmekaaniset ominaisuudet

Sahajauhon virtausmekaanisia ominaisuuksia on tutkittu mm. Ruotsissa ja Norjassa. Tutkimuksia on suoritettu sekä kentällä että laboratorio-olosuhteissa.

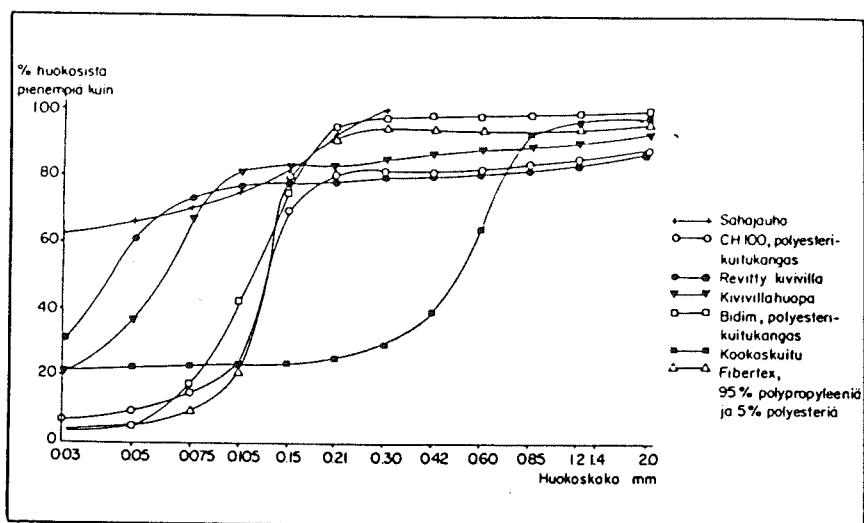
Ericson (1981) tutki eri ympärysainemateriaalien huokoskojakautumaa ja vedenläpäisevyyttä laboratorio-olosuhteissa. Kuvassa 9 on esitetty tutkittujen ympärysainemateriaa-

lien huokoskokojakautuma  $1.5 \text{ kp/cm}^2$  paineen alaisena. Käytetty paine on noin 10 kertaa suurempi kuin paine, joka kohdistuu ympärysaineeseen sen ollessa maassa. Tämä johtuu siitä, että on haluttu kompensoida ympärysaineen kutistuminen, joka tapahtuu sen ollessa pitkän aikaa maassa. Kuvasta nähdään, että sahajauhon huokoskoko on esimerkiksi kookoskuituun verrattuna huomattavasti tätä pienempi. Sahajauholla on lisäksi suurin huokoskokojakautuma verrattuna muihin tutkittuihin ympärysaineisiin (Jonsson, 1985). Sahajauhon huokosista yli 60 % on pienempiä kuin 0.03 mm eli hiesu- ja savirakeiden kokoisia ja muut jakautuvat tasaisesti välille 0.03-0.30 mm, mikä vastaa lähinnä hieta- ja lajitteen raekokoa (0.02-0.20 mm) (Suortti-Suominen, 1982). Kuvassa 10 on esitetty ympärysaineiden huokoskokojakautumat summakäyränä.

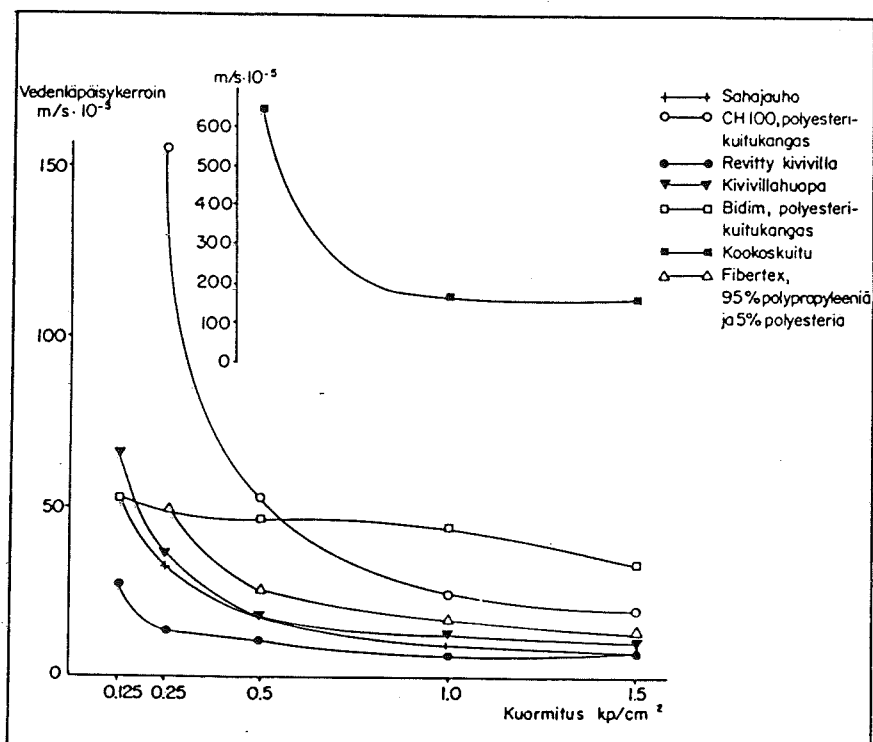
Kuvassa 11 on esitetty eri ympärysaineiden vedenläpäisevyydet kuormituksen funktiona Ericsonin (1978) mukaan. Kuvasta havaitaan, että kookoksella on noin viisinkertainen vedenjohtavuus verrattuna muihin ympärysainemateriaaleihin. Sahajauhon vedenjohtavuus taas on tutkituista materiaaleista toiseksi pienin, johtuen sen pienestä huokoskoosta.



KUVA 9. Ympärysaineiden huokoskokojakautumia lukuisuuskäyränä, kuormitus  $147.2 \text{ kPa}$  ( $1.5 \text{ kp/cm}^2$ ) (Ericson, 1978).



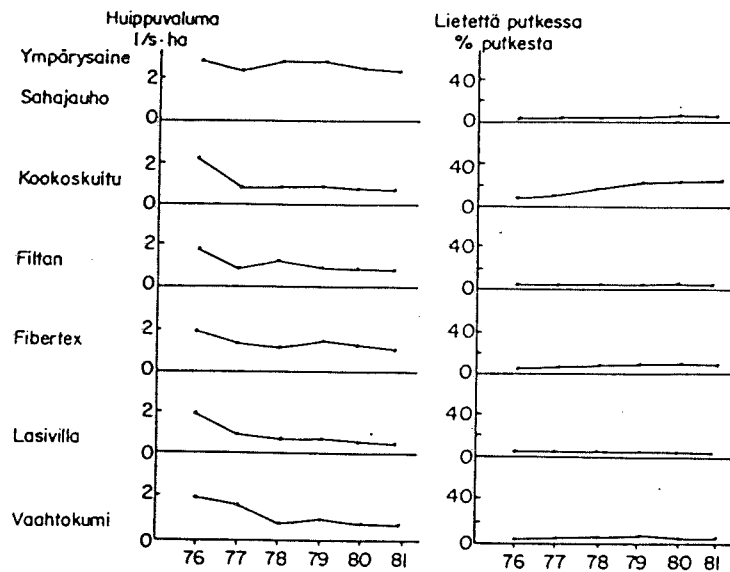
KUVA 10. Ympärysaineiden huokoskokojakautumia summakäyränä, kuormitus 147.2 kPa ( $1.5 \text{ kp/cm}^2$ ) (Ericson, 1978).



KUVA 11. Ympärysaineiden vedenläpäisevyyden riippuvuus kuormituksesta laboratoriokokeessa (Ericson, 1978).

Norjassa on tutkittu eri ympärysaineiden vaikutusta valumaan sekä kenttä- että laboratoriokokein. Kenttäkokeessa koealueiden maalajeina olivat hiesu-hieno hieta l. siltti

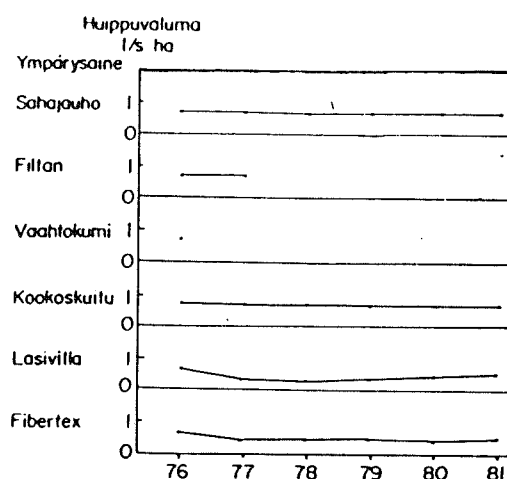
sekä turve. Ensin mainitulla alueella sahajauholla ympäröidystä putkesta saatu huippuvaluma oli paras tutkituista. Kookoskuitukankaan vaikutus oli ensimmäisenä vuotena yhtä hyvä, mutta jo seuraavana vuotena se oli huomattavasti heikompina kuin sahajauhon (kuva 12). Turvemaassa sahajauhon ja kookoskankaan vaikutus huippuvalumaan on ollut yhtäläinen (kuva 13) (Hove, 1982).



KUVA 12. Huippuvaluma ja putkiin kertynyt liete hiesuhietamaassa vuosina 1976-81 suoritetussa kenttäkokeessa (Hove, 1982).

Norjassa suoritettujen laboratoriokokeiden tulokset on esitetty taulukossa 1. Kokeissa käytetty maalaji oli hietainen hiesu ja putkena oli 50 mm:n aallotettu muoviputki. Kokeessa 1 m pitkään laatikkoon sijoitettiin tutkittava ympärysaine ja maalaji. Kokeen kesto-aika oli 10 päivää, ja laatikossa oli tänä aikana pysyvä vesipeitto. Putkesta valuva vesimäärä mitattiin päivittäin. Kokeen loputtua mitattiin putkeen kertynyt ja putkesta veden mukana pois virranneen hienoaineksen määrä.





KUVA 13. Huippuvaluma turvemaalla vuosina 1976-81 suorite-  
tussa kenttäkokeessa (Hove, 1982).

TAULUKKO 1. Valuma sekä 48 mm aallotettuun muoviputkeen  
kertynyt hienoaines eri ympärysaineilla laboratoriokokeessa  
maalajin ollessa siltti (Hove 1983).

Suodatin	Lietettä putkessa (g/m)		Valuma (l/hm)
	Eniten	Vähiten	
Sahanpuru (irto)	2	1	18.2
Sammal	24	4	17.2
Sora	50	5	18.6
Olki	190	82	6.2
Hake	160	120	8.4
Tuore kaarna	80	12	7.5
Kompostoitu kaarna	25	4	16.0
Kookossuodatin	122	82	11.4
Lasivilla	12	2	8.6
Geotekstiili	62	2	10.2
Kanerva	280	88	5.2

Taulukosta 1 havaitaan, että putkeen kertyneen lietteen määrä oli vähäisin sahajauhoa käytettäessä. Tarkasteltaessa putkesta tullutta valumaa havaitaan, että sahajauhoa käytettäessä se oli toiseksi suurin. Ainoastaan soralla valuma oli suurempi. Tämä selittyy sillä, että käytetyn sahajauhon raekoko oli normaalia suurempi (0.1-20 mm).

Eskes (1977) on tutkinut maapartikkelien kulkeutumista ympärysaineen läpi sekä niiden pidättymistä ympärysaineeseen. Ensiksi mainittu seikka antaa kuvan ympärysaineen suodatuskyvystä, ja jälkimmäinen seikka vaikuttaa ympärysaineen vedenjohtavuuteen. Eskesin mukaan maapartikkelit, jotka ovat pienempiä kuin  $1/2 - 1/3$  ympärysaineen pääasiallisesta huokoskoosta, pystyvät tunkeutumaan ympärysaineeseen. Partikkelit, jotka ovat pienempiä kuin  $1/8$  ympärysaineen pääasiallisesta huokoskoosta, kulkeutuvat helposti sen läpi, kun taas useimmat partikkeleista, joiden koko on  $1/4 - 1/8$  ympärysaineen pääasiallisesta huokoskoosta, jäävät ympärysaineeseen. Myös muita partikkelikokoja voi vähäisessä määrin jäädä ympärysaineeseen. Ympärysaineen vedenjohtavuus pienenee, jos ympärysaineeseen jäävien maapartikkelien koko on suurempi kuin puolet ympärysaineen pääasiallisesta huokoskoosta. Jos näiden maapartikkelien koko on pienempi kuin puolet ympärysaineen pääasiallisesta huokoskoosta, ympärysaineen vedenjohtavuus kasvaa. Maa-ympärysainesysteemin vedenjohtavuus pienenee, jos maan raekoko vastaa ympärysaineen huokoskokoa (Jonsson, 1985).

Eskesin (1977) mukaan sahajauhoon, jonka pääasiallinen huokoskoko on 0.03 mm, pääsevät tunkeutumaan maapartikkelit, joiden koko on pienempi kuin 0.015 mm. Näistä partikkeleista jäävät sahajauhoon ne, joiden koko on välillä 0.00375-0.0075 mm. Tätä pienemmät partikkelit kulkeutuvat sahajauhon läpi. Sahajauhon vedenjohtavuus pienenee, jos siihen jäävien maapartikkelien koko on suurempi kuin 0.015 mm ja vastaavasti kasvaa, jos näiden partikkelien koko on tätä pienempi.

#### 4.2 Sahajauhon kyky estää okrasaostumia

##### 4.21 Yleistä okrasaostumista

Salaojaputkiin muodostuva okrasaostuma heikentää monin paikoin salaojien toimivuutta. Salaojaputket, putkireiät

sekä ympärysaine voivat tämän johdosta tukkeutua, ja näin ollen kuivatusteho pienentyä. Tämän seurauksena voidaan salaojaputkia joutua säännöllisesti huuhtelemaan (Grant, 1986). Suomessa okrasaostumat aiheuttavat ongelmia erityisesti Keski- ja Pohjois-Suomen hieta- ja turvemaidilla.

Okrasaostuma on väriltään yleensä punertavaa, keltaista tai ruskeata. Se on rihmamaista, amorfista (vesipitoisuus yli 90 %) ja sen rautapitoisuus on suuri (2-50 % kuivapainosta). Orgaanisen aineksen osuus voi myös olla korkea (2-50 % kuivapainosta). Näiden lisäksi siinä voi olla alumiinia, mangaania, magnesiumia ja kalsiumia sekä pieniä määriä useita muita metalleja (Ford, 1985). Saostuman suuren vaihtelun johdosta sitä ei ole mahdollista kuvata yksiselitteisellä kemiallisella kaavalla. Jos käsitellään puhtaasti kemiallista raudan saostumista, voidaan lopputuloksena esittää kolmiarvoisen raudan oksidihydraatteja  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ . Tähän raudan oksidisaostumaan muodostuu sen kuivuessa ruosteenpunainen väri, josta tulee nimitys ruostesakka (Peltomaa, 1981).

Saostumalle on tyypillistä, että se kosteana ollessaan on pehmeää, mutta kerran kuivuttuaan siitä tulee kovaa ja se tarttuu lujasti putken seinämään. Tämän iskostumisen jälkeen saostuman olomuodon muutokset puhtaassa vedessä ovat hyvin vähäisiä (Peltomaa, 1981). Saostumisen syntyä voidaan tarkastella siltä pohjalta mistä saostumaa aiheuttama vesi on peräisin. Tässä mielessä puhutaan usein kahdesta eri tyyppistä. Sellaisesta, jossa saostuma aiheutuu pelkästään kuivatettavan kohteen olosuhteista. Tähän ryhmään kuuluu meillä suurin osa tasaisten alueiden ruosteisista hietamaista, joissa saostumavaara koko ajan pienenee pellon kuivatustilan parantuessa. Toisena tyyppinä ovat lähteelliset alueet, joissa virtaava pohjavesi pitää jatkuvasti yllä sakkautuman mahdollisuutta (Peltomaa, 1981).

Okrasaostumariskiä voidaan arvioida tarkastelemalla pohjavedessä olevan kahdenarvoisen ferroraudan määrää. Kuntzen

(1982) mukaan saostumariski on pieni, mikäli ferroraudan määrä pohjavedessä ei ylitä 5 mg/l. Toisaalta Kuntze luokittelee saostumariskin "erittäin suureksi", mikäli sen määrä ylittää 6 mg/l (pH<7), tai 9 mg/l (pH>7).

Pohjois-Suomessa on pohjavedestä mitattu edellä mainittuja arvoja huomattavasti korkeampia ferroraudan määriä. Salaojakeskus ry:n mukaan Pohjanmaan rannikkoalueella on useita tuhansia hehtaareja salaojitettua peltoa, joissa ferroraudan määrä on yli 10 mg/l. Okrasta aiheutuneet ongelmat ovat näillä alueilla kuitenkin olleet suhteellisen pieniä verrattuna korkeisiin rautapitoisuuksiin. Tämä johtuu ehkä siitä, että maaperän lämpötila on lähellä nollaa suuren osan vuodesta, ja tämä voi vaikuttaa mikrobiologiseen toimintaan. Myös vedenalainen ojitus, jota käytetään paljon riskialttiilla mailla, pienentää okrasaostumariskiä (Peltonmaa & Veijalainen, 1986).

#### 4.22 Okrasaostumien synty

Tutkimusten mukaan okrasaostumien syntyyn vaadittavan ferroraudan vähimmäismäärä vedessä vaihtelee välillä 0.15-0.22 mg/l. Rautaa saostavien bakteerien läsnäolo on myös välttämätöntä, vaikka muut olosuhteet olisivatkin "ihanteelliset" pelkälle kemialliselle saostumiselle. Okrasaostumat syntyvät bakteerien aiheuttaman saostumisen ja kemiallisen saostumisen yhdistelmänä. Pelkästään kemiallisesti saostunut rauta ei ole tarpeeksi tahmeaa ja liimamaista, eikä se näin ollen pysty tukkimaan putkea tai putkirakoja (Ford, 1985).

Okrasaostumien muodostuessa tapahtuu useita eri prosesseja. Ne eivät kaikki tapahdu samoissa olosuhteissa, mutta niille on yhteistä se, että ne kaikki tarvitsevat hapetta. Okrasaostumien muodostuminen voidaan jakaa kolmeen osaan.

##### 1. Bakteerien aiheuttama raudan saostuminen.

2. Kemiallinen raudan saostuminen, jonka jälkeen saostunut, kolloidinen rauta tarttuu bakteerimassaan.
3. Raudan liukoisten orgaanisten kompleksiyhdisteiden saostuminen bakteerien toiminnan seurauksena. Näissä liukoisissa orgaanisissa kompleksiyhdisteissä voi olla joko ferro- tai ferrirautaa (Ford, 1985).

Nämä eri prosessit voivat tapahtua joko samanaikaisesti tai peräkkäin. Kemiallista saostumista tapahtuu pääasiassa salaojituksen alkuvaiheessa, koska happea on tällöin paljon salaojaputkessa ja putken ympäristössä. Tämän jälkeen tapahtuva saostuminen on pääasiassa biokemiallista. Hanertin (1972) ja Khrutskayan (1970) mukaan biokemiallisesti muodostuneen okran osuus on 80-98 % ja kemiallisesti muodostuneen okran osuus vain 2-20 % (Kuntze, 1982).

Rautaa saostavista bakteereista tehokkaimpia ovat rihmamaiset bakteerit, kuten Gallionella, Leptothrix ja Sphaerotilus, jotka myös lisääntyvät nopeasti. Näiden bakteerien muodostama okra tarttuu salaojaputkeen huomattavasti lujemmin kuin kemiallisesti muodostunut okra (Ford, 1985).

Sauvamaiset bakteerit, kuten Pseudomonas ja Enterobacter, voivat myös saostaa rautaa, mutta näin muodostuneen okran määrä ei ole yhtä suuri kuin rihmamaisten bakteerien muodostama okra (Ford, 1985).

Erästä okratyyppiä muodostuu vain, mikäli maaperä on riittävän hapanta. Tämä okratyyppi aiheuttaa ongelmia ojitettaessa rikkikiisupitoisia maita. Rikkikiisua muodostuu raudasta ja rikkivedystä. Kun tällaisia maita ojitetaan, rikkikiisus ensiksi hapettuu ferroraudaksi ja sulfaatiksi. Sulfaatti muuttuu rikkihapoksi, joka laskee maan pH:n alle 3.5. Tämän jälkeen sauvamainen bakteeri, Thiobacillus ferrooxidans, muuttaa liukoisen raudan okraksi. Tämä bakteeri pystyy toimimaan vain happamissa olosuhteissa. Näitä rikkikiisupitoisia maita, joita usein kutsutaan alunamaiksi, on

paljon Pohjois-Euroopan ja Skandinavian maiden rannikkoalueilla. (Ford, 1985). Suomessa tällaisia maita on arviolta 50000 hehtaaria (Peltomaa & Veijalainen, 1986).

Jotkut kemialliset yhdisteet voivat stimuloida bakteerien lisääntymistä ja näin ollen lisätä okran muodostumista. Tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi parkkihappo ja alikloorihapoke, jotka pieninä pitoisuuksina voivat lisätä bakteerikasvua (Ford, 1985).

Raudan orgaanisten kompleksiyhdisteiden vaikutusta okrasaostumien syntyyn on vaikea arvioida. Rauta voi muodostaa kompleksiyhdisteitä monien orgaanisten yhdisteiden kanssa. Tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi parkki-, viini-, maito-, ascorbiini- ja sitruunahappo, sekä aromaattiset hydroksyyliyhdisteet. Nämä okran muodostusta lisäävät kompleksiyhdisteet ovat yleensä stabiileja ja pysyvät helposti liukoisessa muodossa. Toisaalta jotkut näistä samoista raudan orgaanisista kompleksiyhdisteistä voivat estää okran muodostumista. Esimerkiksi parkkihappo estää okran muodostumista, mikäli sen pitoisuus vedessä on vähintään 10 mg/l. Jos sen pitoisuus sen sijaan on 1 mg/l, niin se lisää sitä (Kuntze, 1982).

#### 4.23 Sahajauhon vaikutus okrasaostumiin

Schirmer havaitsi kokeissaan vuonna 1957, että orgaaniset ympäryksineet estivät okran muodostumista salaojaputkiin. Ford ja Spencer (1962) kokeilivat sahajauhoa ympäryksineenä ja havaitsivat saman asian. Eggelsman ja Scheffer (1970) kokeilivat erilaisia ympäryksineitä suoalueella, jonka pohjaveden ferroraudan pitoisuus vaihteli välillä 6-21 mg/l. Alueella oli pysyvä okrasaostumariski, eli rautapitoista pohjavettä virtasi alueelle (allochthonous clogging). Kun putket neljän vuoden kuluttua kuluttua kaivettiin ylös, havaittiin myös niissä sama ilmiö. Putki, joka oli ympäröity sahajauholla oli vähiten tukkeutunut. Saha-

jauhossa oli 80 % kuusta ja 20 % tammea, ja sitä käytettiin 12 litraa putkimetriä kohti. Putki, jonka ympärillä ei ollut lainkaan ympärysainetta, oli tukkeutunut eniten. Putkien tukkeutumista tarkasteltiin mittaamalla niiden sisääntulovastukset (taulukko 2) (Kuntze, 1982).

TAULUKKO 2. Pohjaveden hydrostaattinen paine eri ympärysaineilla (Eggelsman & Scheffer, 1974).

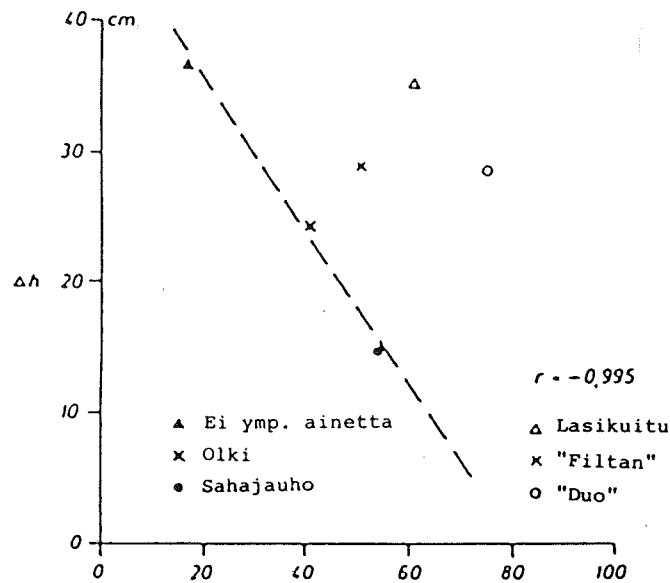
Ympärysaine	$\Delta h$ cm	Suhde- luku
Ei ympärysainetta	36.5	100
Lasikuitu	35.5	97
Sahajauho	16.0	44
Olki	24.5	67
"Duo"	28.5	78
"Filtan"	29.9	78

Koko kokeen ajan orgaanisilla ympärysaineilla ympäröidyillä putkilla oli pienempi sisääntulovastus kuin muilla putkilla.

Eri putkiin kertyneen okran määrää tarkastellaan taulukossa 3. Kuvassa 14 on esitetty eri putkien vapaina pysyneiden reikien määrä, ja taulukossa 4 tarkastellaan eri putkista virranneen veden eri aineiden pitoisuuksia.

TAULUKKO 3. Okran määrä ja koostumus eri ympärysaineilla ympäröidyissä putkissa (keskimääräiset arvot) (Eggelsman & Scheffer, 1978).

Ympärysaine	Lietteen määrä putkessa		Suolahappoon liukenevan jae		Fe		C	N	C/N
	(g/m)	(%)	(g/m)	(%)	(g/m)	(%)	(%)	(%)	
Ei ympärysainetta	60	100	23	38	13	21	5.9	0.41	14
Lasikuitu	55	91	5	10	22	41	8.7	0.46	19
Sahajauho	14	24	5	35	2	14	14.5	0.96	15
Olki	33	55	9	27	9	26	7.7	0.49	15
"Duo"	71	117	6	8	28	39	8.5	0.39	22
"Filtan"	38	64	5	13	16	42	8.9	0.40	22



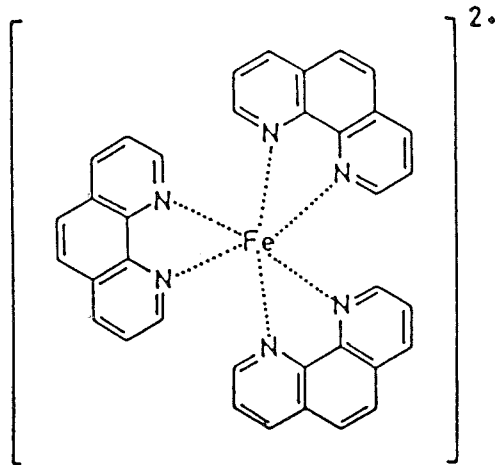
KUVA 14. Sisääntulovastus ja tukkeutumattomien putkirei-  
kien määrä neljän vuoden jälkeen Calhornin koepellolla  
(Eggelsmann & Scheffer, 1974)

TAULUKKO 4. Eri ympäryksineillä ympäröidyistä putkista  
virranneen veden pitoisuuksia (viiden näytteen keskiarvo)  
(1970-1973) (Scheffer, 1974).

Ympäryksine	Fenolipitoisuus (mg/l)	KMnO <sub>4</sub> -kulutus (mg/l)	Fe <sup>2+</sup> -ionien määrä kokonaisraudasta Fe (%)
Ei ympäryksinettä	0.2	37	53
Sahajauho	0.7	126	83
Olki	0.3	48	69
"Duo"	0.3	38	63
"Filtan"	0.3	39	79
Lasikuitu	0.2	38	59

Parkkiainetta sisältävät orgaaniset ympäryksineet muodosta-  
vat raudan kanssa suhteellisen pysyviä yhdisteitä, ja tämän  
seurauksena kemiallinen ja biokemiallinen okran muodostus  
hidastuu (Eggelsmann, 1977). Puuaineesta vapautuva parkki-  
aine on fenolista, ja näin ollen se muodostaa raudan kanssa  
kompleksisia kelaatteja. Tämän seurauksena rauta ei enää  
hapetu, vaan pysyy liukoisessa muodossa (kuva 15) (Kuntze  
1982).



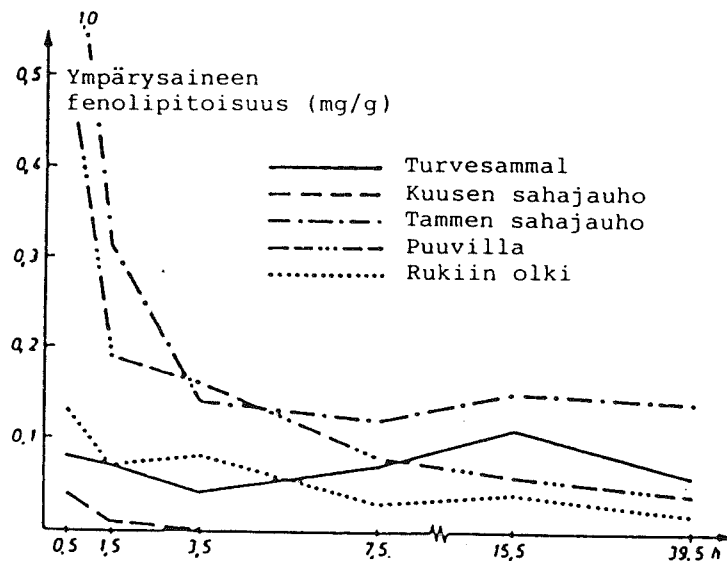


KUVA 15. Rauta-fenantroliini kompleksiyhdiste

Parkkiaineen eli tanniinin kykyä muodostaa kompleksiyhdisteitä raudan kanssa on koetettu käyttää hyväksi kehittämällä ympärysaineita, jotka sisältävät mahdollisimman paljon tanniinia. Näiden ympärysaineiden pitäisi hyvin tehokkaasti estää okran muodostumista. Taulukossa 5 on esitetty tanniinia sisältävien aineiden fenolipitoisuuksia. Näille aineille on ominaista myös se, että ne lisäävät veden kemiallista hapen kulutusta. Kuvassa 16 esitetään eri ympärysainemateriaalien kykyä vapauttaa tanniinia (Kuntze, 1982).

TAULUKKO 5. Tanniinia sisältävien ympärysaineiden fenolipitoisuudet ja kemiallisen hapenkulutuksen arvot (Kunze & Scheffer, 1974).

Ympärysaine	Fenolipitoisuus/ g ympärysainetta	KMnO <sub>4</sub> -kulutus/ g ympärysainetta
Turvesammal	0.43 mg	59.3 mg
Puuvilla	1.02 mg	73.5 mg
Rukiin olki	0.37 mg	95.3 mg
Kuusen sahajauho	0.05 mg	49.8 mg
Tammen sahajauho	1.86 mg	110.6 mg
Mimosa-puun kuori	51.3 mg	1990.0 mg
Trillo	53.9 mg	2746.0 mg



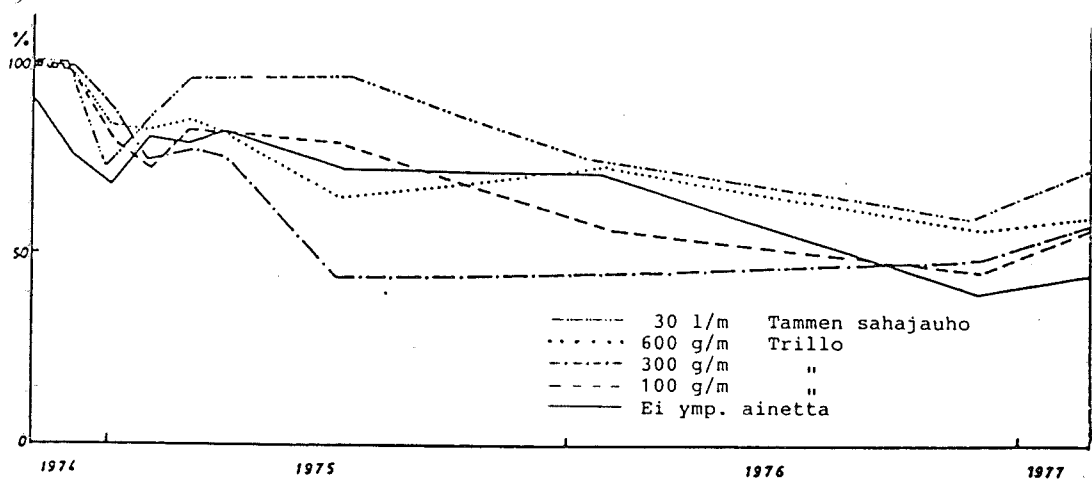
KUVA 16. Eri ympärysaineiden fenolipitoisuuksia ajan funktiona (Kuntze & Scheffer, 1974).

Mimosa-puusta (*Acacia decurrens*, *acacia molissima*) ja Kaukasian tammesta (*Quercus valonea*=trillo) valmistettu ympärysaine, "Antoc", sisältää paljon tanniinia. Mimosan tanniinipitoisuus on 33 % ja trillon jopa 40 %. Kenttäkokeissa tämän havaittiin estävän hyvin okran muodostumista. Riittävän tanniinipitoisuuden määrittämisessä on kuitenkin vaikeuksia. Aivan salaojituksen alkuvaiheessa tanniinia nimitäin liukenee veteen ylimäärin, eikä kaikkea tanniinia tule käytetyksi raudan kompleksiyhdisteiden muodostamiseen. Tämän seurauksena veden kemiallinen hapenkulutus kasvaa. Kemiallinen hapenkulutus voi olla jopa 1200 mg/l. Näin korkeita arvoja voidaan kuitenkin mitata vain noin kahden ensimmäisen viikon aikana. Tämän jälkeen arvot nopeasti laskevat ollen sen jälkeen n. 100 mg/l (Kuntze, 1982).

Antoc-ympärysaineen suuresta tanniinipitoisuudesta on kuitenkin hyötyä vain salaojituksen alkuvaiheessa, jolloin myös sen aiheuttama kemiallinen hapenkulutus on suuri. Tämän jälkeen sen kyky muodostaa raudan kanssa kompleksiyhdisteitä pienenee huomattavasti (kuva 17). Kuvasta 17 havaitaan myös, että vain tammen sahajauho (30 litraa/putki-

metri) pystyi toimimaan kunnolla pitkän aikaa. Tanniini vapautuu sahajauhosta ilmeisesti hitaammin kuin Antocista. Tämä on otettava huomioon, sillä salaojaputken on toimittava moitteettomasti pitkän aikaa (Kuntze, 1982).

Suomessa kasvavista puista myös männyn sahajauhon on todettu hidastavan okran muodostumista (Ford, 1985).



KUVA 17. Ferroraudan pitoisuus salaojasta purkautuvassa vedessä tammen sahajauhoa ja eri tanniinipitoisuuksia sisältäviä Antoc-ympäryksaineita käytettäessä (Kuntze, 1982).

#### 4.4 Toimintaikä

Sahajauho koostuu pääasiassa selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Lisäksi siinä on pieniä määriä vesiliukoisia aineita, kuten yksinkertaisia sokereita, aminohappoja ja alifaattisia happoja, sekä eetteri- ja alkoholi-liukoisia aineita, kuten rasvoja, öljyjä, vahoja ja hartseja (Alexander, 1976).

Maassa ollessaan sahajauhon hajoaminen tapahtuu siten, että ensiksi häviävät vesiliukoiset aineet. Selluloosa ja hemiselluloosa eivät häviä yhtä nopeasti kuin vesiliukoiset aineet, mutta myöskään nämä eivät säily kovinkaan pitkään. Ligniini sitä vastoin on vaikeasti hajoava, ja näin ollen

sen suhteellinen osuus sahajauhosta kasvaa selluloosan ja hemiselluloosan hajotessa (Alexander, 1976). Orgaanisen ympäryksineen merkittävä hajoaminen alkaa vasta silloin, kun ligniinikin alkaa hajota (Suortti-Suominen, 1982).

Ligniinin hajoaminen riippuu lämpötilasta, käytettävissä olevan typen määrästä sekä happipitoisuudesta. Lämpötilan noustessa ligniinin hajoaminen nopeutuu. Mikäli lämpötila on lähellä nollaa, on hajoaminen hidasta. Ligniini hajoaa sekä aerobisissa että anaerobisissa olosuhteissa, joskin anaerobisissa olosuhteissa hajoaminen on huomattavasti hitaampaa. Typen määrä vaikuttaa siten, että hajoaminen on sitä nopeampaa, mitä enemmän typpeä on käytettävissä. Myös puun iällä on havaittu olevan vaikutusta ligniinin hajoamiseen. Mitä nuoremasta puusta on kyse, sitä nopeammin ligniini hajoaa. Syytä tähän ei kuitenkaan ole vielä tarkoin selvitetty (Alexander, 1976).

Svobodova ja Vinsova (1979) ovat tutkineet orgaanisten ympäryksineiden hajoamista laboratorio-olosuhteissa. Tutkittavat ympäryksinemateriaalit olivat kevätvehnän olki, kuusen sahajauho, kuusen kuori ja tammen kuori. Tulosten mukaan kevätvehnä hajosi nopeimmin, kuusen sahajauho hieman nopeammin kuin kuusen kuori, ja tammen kuori oli pitkäikäisin. Ympäryksineiden hajoaminen oli nopeampaa lievästi happamassa savimaassa kuin ravinneköyhässä, happamassa hiuesavimaassa. Maaperän korkean typpipitoisuuden, samoin kuin vedessä olevan korkean nitraattipitoisuuden, havaittiin nopeuttavan lahoamista.

Käytännön kokemukset Norjassa ovat osoittaneet, että 20 vuoden maassa olon jälkeen havupuun sahajauhosta, jota käytetään 10-20 litraa putkimetriä kohti, on lahonnut noin puolet.

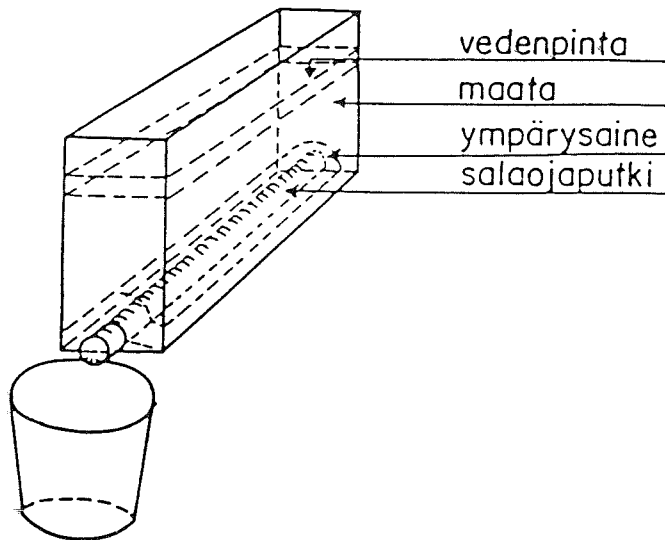
## 5. LABORATORIOKOKKEET

### 5.1 Koejärjestelyt

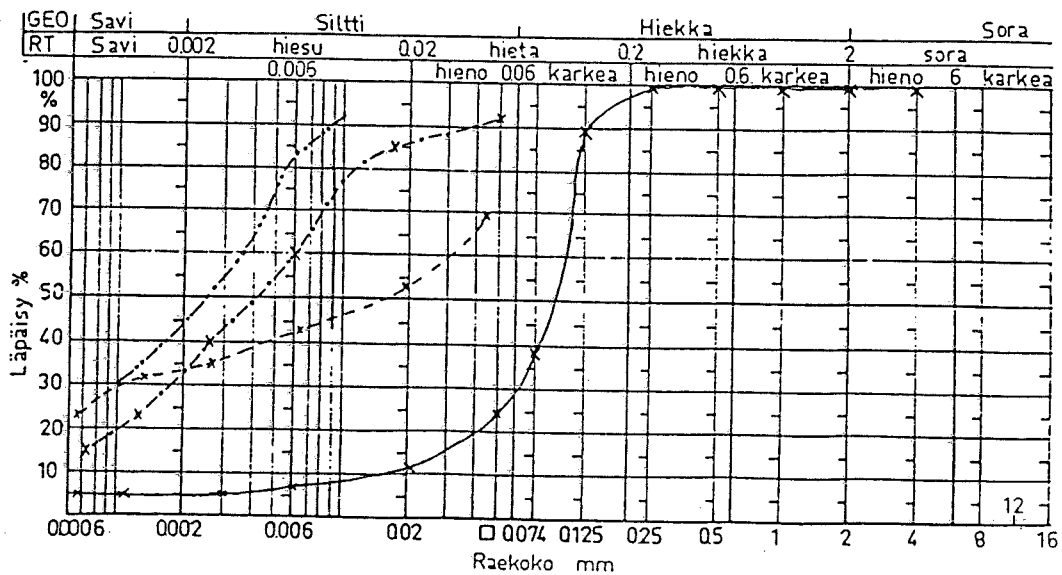
Laboratoriokoe sahajauhon soveltuvuudesta ympärysaineeksi jakautui kahteen osaan. Ensimmäisessä kokeessa tutkittiin sahajauhon virtausominaisuuksia ja kykyä estää salaojaputken liettymistä eri maalajeilla. Toisessa kokeessa tutkittiin sahajauhon kykyä estää okrasaostumien muodostumista. Molemmat kokeet tehtiin huonelämpötilassa.

Sahajauhon virtaus- ja suodatusominaisuuksien tutkimiseksi männyn sahajauholla esipäällystetty 50 mm:n PVC-putki sijoitettiin 0.3 \* 1.5 \* 0.7 m suuruiseen laatikkoon. Tämän jälkeen laatikkoon laitettiin tutkittavaa maalajia siten, että sitä salaojaputken päältä mitattuna oli 30 cm. Maakerros tiivistettiin siten, että oikovirtausta ei esiintynyt. Tutkitut maalajit olivat karkea hieta, hietainen hiesu, hiesu ja aitosavi. Maakerroksen päällä pidettiin n. 15 cm korkuista vesipeittoa. Vedenkorkeuden tasaamiseen käytettiin allasta. Salaojaputkesta valuva vesi kerättiin putken alla olevaan astiaan, josta vesi johdettiin pois poistoletkun avulla. Poistoletkun päähän laitettiin suodatinsukka estämään hienoaineksen karkaamista. Yksittäisen kokeen kesto oli 10 vuorokautta. Koejärjestely on esitetty kuvassa 18 ja käytettyjen maalajien rakeisuuskäyrät kuvassa 19.

Sahajauhon kykyä estää okrasaostumien muodostumista tutkittiin asettamalla kaksi 50 mm:n PVC-putkea 0.6 \* 1.7 \* 0.7 m suuruiseen laatikkoon rinnakkain. Putkien etäisyys toisistaan oli n. 30 cm. Toinen putkista oli esipäällystetty männyn sahajauholla, ja toisen putken ympärysaineena käytettiin soraa siten, että putken päälle tuli n. 10 cm:n kerros. Käytetyn soran rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 20. Laatikko täytettiin rautapitoisella turpeella siten, että sitä putkien päältä mitattuna oli n. 30 cm:n kerros. Tämän jälkeen laatikossa kierrätettiin n. 120 litraa sade-



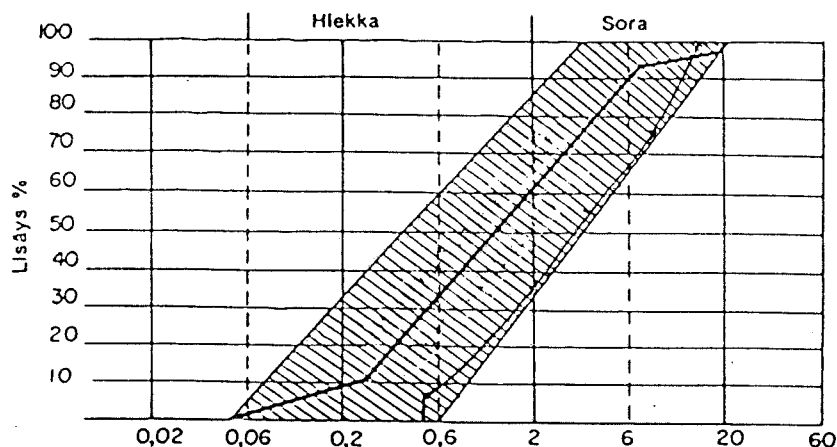
KUVA 18. Koeallas sahajauhon tutkimiseksi eri maalajeilla laboratorio-olosuhteissa.



KUVA 19. Laboratoriokokeessa käytettyjen maalajien rakeisuuskäyrät. ————— karkea hiehta, - - - - hietainen hiesu, - - - - hiesu, - - - - aitosavi.

vettä n. 3,5 kk:n ajan kaatamalla putkista valunut vesi takaisin laatikkoon. Tämä tehtiin päivittäin n. 2-3 kertaa. Sadevettä kierrätettiin sen takia, että sen rautapitoisuus saataisiin mahdollisimman korkeaksi. Sadevettä jouduttiin

tosin välillä lisäämään n. 60 litraa haihdunnan kompensoimiseksi. Lisätty sadevesi oli laadultaan samanlaista kuin alkuperäinen.



KUVA 20. Laboratoriokokeessa käytetyn ympärysainesoran rakeisuuskäyrä. Viivoitettu alue esittää ohjeellista rakeisuusaluetta.

## 5.2 Analyysimenetelmät

Kokeessa, jossa tutkittiin sahajauhon virtaus- ja suodatusominaisuuksia eri maalajeilla, mitattiin putkesta tullut virtaama pistokokein 2-3 kertaa vuorokaudessa. Kokeen lopputtua mitattiin salaojaputkeen sekä valuma-astiaan kertyneiden lietteiden määrät. Lietteet kuivattiin  $+105^{\circ}\text{C}$  asteessa sekä punnittiin. Kokeissa käytettyjen maalajien rakeisuuskäyrät määritettiin areometrikokeella. Ennen kokeen alkua määritettiin myös sahajauhon vedenjohtavuutta kuvaava k-arvo sekä sahajauhon huokoskokojakauma. k-arvo määritettiin mittaamalla ensin 10 cm korkean hiekkapatsaan k-arvo halkaisijaltaan 7 cm:n sylinterissä. Hiekan raekoko oli välillä 0.1-0.6 mm. Tämän jälkeen sylinteriin pohjalle laitettiin 3 cm:n kerros sahajauhoa, ja tämän päälle 7 cm:n kerros hiekkaa, ja mitattiin hiekan ja sahajauhon yhteinen k-arvo. Sahajauhon k-arvo saatiin tämän jälkeen kaavasta:

$$k_s = ((k_y * d_s / d) - (k_y * d_h / k_h))$$

missä

$k_s$  = sahajauhon k-arvo

$k_y$  = hiekan ja sahajahauhon yhteinen k-arvo

$d_s$  = sahajauhopatsaan korkeus (3 cm)

$d$  = 10 cm

$d_h$  = hiekkapatsaan korkeus (7 cm)

$k_h$  = hiekan k-arvo

Okrasaostumakokeessa (turvekokeessa) mitattiin molemmista putkista tulleiden virtaamien määrät kokeen alussa ja lopussa. Kokeen alussa mitattiin puhtaan sadeveden pH, redox-potentiaali ja kokonaisrauta, sekä tarkasteltiin näiden muutosta ensimmäisellä kierrätyskerralla. Veden rautapitoisuuden kasvua tarkkailtiin kokeen aikana. Veden rautapitoisuus määritettiin mittaamalla kokonaisraudan määrä SFS-määrityksellä (Suomen standardisoimisliitto, 1976). Kokeen loputtua mitattiin putkiin kertyneiden okrasaostumien määrät. Saostumista määritettiin niiden kokonaisrautapitoisuudet sekä orgaanisen aineen pitoisuudet. Kokonaisrautapitoisuudet määritettiin Tammin uutolla (Page & Miller & Keeney, 1982). Orgaanisen aineen pitoisuudet määritettiin punnitsemalla näyte ennen ja jälkeen hehkutuksen 105 °C asteessa. Kokeen päätyttyä tarkasteltiin myös putkireikien tukkeutumisista.

### 5.3 Laboratoriokokeiden tulokset

Taulukossa 6 on esitetty sahajauhopotkesta tullut virtaama eri maalajeilla. Taulukkoon on merkitty päivittäin mitattujen arvojen keskiarvot. Päivittäin mitatut arvot poikkesivat toisistaan vain n. 0.2 ml/s.



TAULUKKO 6. Virtaamat eri maalajeilla sahajauholla ympäröidyistä salaojaputkista laboratoriokeudessa

Aika	Virtaama (ml/s)			Aito savi
	Karkea hieta	Hietainen hiesu	Hiesu	
2 h	4.67	0.40	3.47	0.10
1 vrk	4.13	0.67	----	0.23
2 vrk	4.20	0.40	4.18	----
3 vrk	4.24	0.67	----	0.47
4 vrk	4.15	0.83	4.10	----
5 vrk	4.30	0.67	4.00	----
6 vrk	----	----	3.50	----
7 vrk	----	----	3.33	----
8 vrk	4.24	0.67	4.00	----
9 vrk	4.17	0.73	----	----
10 vrk	4.10	0.53	----	----
11 vrk	4.13	0.55	----	----
12 vrk	4.13	----	----	----

Taulukosta 6 havaitaan, että virtaamissa ei tapahtunut oleellista muutosta kokeen aikana. Savi oli niin huonosti vettä läpäisevää, että virtaama loppui täysin 4 vrk:n kulluttua kokeen alusta.

Taulukossa 7 on esitetty putkeen kertyneen ja putkesta veden mukana virranneen lietteen määrä eri maalajeilla. Savessa tapahtui oikovirtausta välittömästi kokeen alettua, ja putki liettyi nopeasti.

Kokeessa käytettyjen maalajien rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 20.

Sahajauholla esipäällystetyssä putkessa olevan sahajauhon vedenläpäisevyydeksi saatiin  $10.4 \cdot 10^{-3}$  cm/s. Sahajauhon huokosista yli 60 % oli pienempiä kuin 0.05 mm ja loput jakautuivat tasaisesti välille 0.3-1.0 mm. Sahajauhokerroksen paksuus putken päältä mitattuna oli 12 mm.

TAULUKKO 7. Putkeen kertyneen ja putkesta veden mukana virranneen lietteen määrä sahajauholla ympäröidystä salaojaputkesta laboratorikokeessa.

Maalaji	Putkesta veden mukana virranneen lietteen määrä (g)	Putkeen jääneen lietteen määrä (g/m)
Karkea hieta	0	0
Hietainen hiesu	197.4	10.0
Hiesu	24.0	1.7
Savi	1353.7	56.5

Okrasaostumakokeessa käytetyn turpeen pH ja redox-potentiaali mitattiin kokeen alussa ja lopussa 20 cm:n syvyydestä. Kokeen alussa pH oli 4.4 ja redox-potentiaali +375. Kokeen lopussa pH oli 4.2 ja redox-potentiaali +360.

Sadeveden pH:n, redox-potentiaalin ja kokonaisraudan muutokset ensimmäisen kierrätyskerran jälkeen on esitetty taulukossa 8.

Kun sadevettä kierrätettiin, sen rautapitoisuus nousi siten, että kahden kuukauden kuluttua se oli sahajauholla esipäällystetystä putkesta mitattuna 6.14 mg/l ja soralla ympäröidystä putkesta mitattuna 6.04 mg/l. Kokeen lopussa, 3.5 kk:n kuluttua, vastaavat arvot olivat sahajauholla 7.88 mg/l ja soralla 6.75 mg/l.

Kokeen alussa sahajauholla esipäällystetystä putkesta tullut virtaama oli 71 % soralla ympäröidystä putkesta tulleesta virtaamasta. Kokeen lopussa vastaava arvo oli 51 %.

Sahajauholla esipäällystetyssä putkessa ei kokeen loputtua ollut havaittavissa minkäänlaista saostumaa. Soralla ympäröidystä putkesta saatiin n. 2 g saostumaa, joka kuivutuaan oli ruskehtavan harmaata. Tämän saostuman orgaanisen

TAULUKKO 8. Sadeveden pH, redox-potentiaali ja kokonaisrauta ennen ja jälkeen ensimmäisen kierrätyskerran laboratoriokeessa.

	Sadevesi ennen kokeen alkua	Sahajauhopotkesta valunut vesi	Soraputkesta valunut vesi
pH	4.8	3.6	4.1
Redox	+207	+295	+300
Kokonaisrauta (mg/l)	0.53	3.06	3.40

aineksen pitoisuus oli 28 % kuivapainosta, mutta sen rautapitoisuus oli vain 0.7 %.

Kummassakaan putkessa ei ollut havaittavissa putkireikien tukkeutumista.

#### 5.4 Tulosten tarkastelu

Karkeassa hiedassa sahajauho toimi moitteettomasti. Putkeen ei kertynyt lainkaan lietettä, eikä sitä myöskään ollut putkesta virtaavassa vedessä. Myös hiesussa sahajauho toimi hyvin. Putkeen kertyi lietettä vain 1.7 g/m, eikä sitä putkesta virtaavassa vedessäkään ollut muuta kuin 24 g. Hietaisella hiesulla sahajauho ei toiminut aivan yhtä hyvin. Veden mukana virtasi n. 200 g lietettä. Esimerkiksi hiesuun verrattuna tämä on melko paljon, sillä hiesulla virtaama oli noin kuusi kertaa suurempi kuin hietaisella hiesulla. Putkeen jääneen lietteen määrä oli kuitenkin vähäinen, vain 10 g/m. Sahajauhon toimivuudesta savessa ei saatu varmaa tietoa, sillä saven vedenläpäisevyys oli niin pieni, että virtaus tyrehtyi välillä kokonaan. Koe jouduttiin keskeyttämään. Aivan kokeen alussa tapahtui oikovirtausta ja veden mukana virtasi n. 1300 g lietettä kahden ensimmäisen minuutin aikana.

Virtaamat pysyivät suurin piirtein vakioina koko kokeen ajan jokaisella maalajilla, joten sahajauhon tukkeutumista ei tapahtunut.

Okrasaostumakokeessa saatiin muodostumaan liukoista ferroutrautaa. Tätä todistaa se, että putkista valuvassa vedessä pystytiin havaitsemaan rautapitoisuuden kasvua. Ferrorautaa muodostuu vain hapettomissa olosuhteissa, ja Carterin (1986) mukaan maaperässä ei ole lainkaan, tai on vain vähän happea, mikäli redox-potentiaali on +350 tai vähemmän. Laboratoriokokeessa turpeesta mitattu redox-potentiaali oli vain vähän tämän yli, mutta ilmeisesti se silti oli riittävän alhainen. On kuitenkin huomioitava, että redox-potentiaalia ei pystytty mittaamaan syvemmältä kuin 20 cm turpeen pinnasta.

Kokeen loppuvaiheessa sahajauholla ympäröidystä putkesta valuvassa vedessä oli jokaisella määrityskerralla enemmän rautaa kuin soralla ympäröidystä putkesta valuvassa vedessä. Tämä todistaneekin sitä, että sahajauhossa oleva parkkiaine muodosti raudan kanssa liukoisia kompleksiyhdisteitä.

Okrasaostumaa ei saatu muodostumaan kumpaankaan kokeessa käytettyyn putkeen. Tähän oli luultavasti syynä kokeen lyhyys (3.5. kk). Selityksenä voi olla myös se, että kierrätettävän veden rautapitoisuutta ei saatu riittävän suureksi. Kuntzen (1982) mukaan okrasaostumariski on erittäin suuri, mikäli veden rautapitoisuus on yli 6 mg/l ja pH on alle 7. Laboratoriokokeessa pH oli koko ajan alle 7, mutta kierrätetyn veden rautapitoisuus nousi yli 6 mg:n litrassa vasta kahden kuukauden kuluttua kokeen aloittamisesta.

Koe antoi hyvän kuvan sahajauhon toimivuudesta eri maalajeilla. Sen kyvystä estää okrasaostumia ei kuitenkaan saatu kokeellista tietoa.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Sahajauhон suodatusominaisuudet ovat erittäin hyvät johtuen sen pienestä huokoskoosta. Pieni huokoskoko aiheuttaa myös sen, että sahajauhон vedenjohtokyky on esimerkiksi soran vedenjohtokykyä pienempi. Sahajauho lahoaa ollessaan maassa. Käytännön kokemusten mukaan n. 20 vuodessa sahajauhosta on lahonnut puolet. Sahajauho ei sovellu vedenalaiseen ojitukseen, sillä se muuttuu tällöin vettäläpäisemmäksi massaksi.

Sahajauho sisältää parkkiainetta, joka muodostaa raudan kanssa liukoisia kompleksiyhdisteitä. Tätä sahajauhон ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi alueilla, joilla tiedetään olevan vaaraa rauta- eli okrasaostumista.

Laboratoriokokeiden perusteella sahajauho soveltuu erittäin hyvin karkeille hietamaille sekä hiesumaille. Hietaisessa hiesussa se toimii tyydyttävästi.

Laboratoriokoe soveltui hyvin sahajauhон suodatus- ja vedenläpäisykyvyn tutkimiseen, mutta huonosti sen okrasaostumia ehkäisevän kyvyn tutkimiseen. Tätä olisikin vastaisuudessa tutkittava lähinnä kenttäkokein, jolloin myös koeaikaa voitaisiin huomattavasti pidentää.

Sahajauhон käyttö ei vielä nykyisin ole soran käyttöä edullisempaa eräitä poikkeustapauksia lukuunottamatta. On kuitenkin todennäköistä, että jo lähitulevaisuudessa tilanne on päinvastainen, sillä soran hinta nousee koko ajan. Irto-sahajauhон käyttö on tällä hetkellä edullisempaa kuin sahajauholla esipäälllystetyn putken käyttö. Toisaalta valmiiksi ympäröidyn sahajauhopotken hinta laskee nykyisestään, mikäli sen sarjatuotanto aloitetaan.

## KIRJALLISUUSLUETTELO

- Alexander, M. 1976. Introduction to soil microbiology. New York. 467 p.
- Andersen, Sv. Aa. 1983. Versuche und Erfahrungen mit Dränmethoden und Dränmaterialen in Dänemark. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 24, 4, ss. 223-227.
- Dierickx, W. 1978. The influence of envelope materials in preventing silting-up of drain pipes. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Proceedings of the International Drainage Workshop, publication 25, pp. 306-318.
- Dierickx, W. 1980. Electrolytic analogue study of the effect of openings and surrounds of various permeabilities on the performance of field drainage pipes. Medelingen van het Rijksstation voor Landbouwtechniek, B-92220 Merelbeke, publ. no. 77, 238 p.
- Dierickx, W. 1982. Structural stability of soil and the need for drainage envelopes. Advances in Drainage, Proceedings of the American Society of Agricultural Engineering, Fourth National Drainage Symposium, December 13-14. pp. 79-86.
- Dierickx, W. 1983. Hydraulic gradients near subsurface drains and soil erosion. American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE 26, 5, pp. 1409-1412.
- Dierickx, W. 1986. Field experience and laboratory research on drainage envelopes. Proceedings of International Seminar on Land Drainage, TKK, Rakennusinsinööriosasto, Vesitekniikka, Otaniemi. pp. 51-70.

- Eggelsmann, R. 1977. Experiences with various drain materials. International Commission on Irrigation and Drainage, Tenth Congress, R. 29, Question 34.1, pp. 401-414.
- Eggelsmann, R. 1978. Subsurface drainage instructions. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID). National Committee of the Federal Republic of Germany. Bulletin 6. 283 p.
- Ericson, A. 1981. Egenskaper hos dräneringsrör lindade med filter. Lantmannen 102, 8, ss. 18-19.
- Ford, H.W. 1985. Iron ochre and related sludge deposits in subsurface drain lines. Institute of Food and Agricultural Sciences. Circular 675, University of Florida. 12 p.
- Grant, R. 1986. Experiments with drainage materials and submerged drains on ochrous sites. Proceedings of International Seminar on Land Drainage. TKK, Rakennusinsinööri-  
sasto, Vesitekniikka, Otaniemi pp. 310-323.
- Hove, P. 1982. Filter materials for drains - experiences in Norway. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flubereinigung 23, 2, pp. 104-109.
- Hove, P. 1983. Organiset ympärysaineet. Salaojitusseminaa-  
ri Espoon Hanasaarella 18.11.1983. Salaojakeskuksen julkai-  
su 2/1984, ss. 32-38.
- Jarret, A.R., Fisher, L.S. 1984. Sediment retention effi-  
ciency of synthetic filter fabrics. American Society of  
Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE 27, 2, pp.  
429-436.
- Jonsson, B. 1985. Organiska och syntetiska fibermaterial  
som dräneringsfilter. Sveriges Lantbruksuniversitet, Insti-  
tutionen för Markvetenskap, Avdelningen för Lantbrukets  
Hydroteknik, rapport 145, 48 s.

Kanervisto, O. 1985. Salaojaputkien ympärysaineet. Käytännön Maamies 34, 6, ss. 59-62.

Knops, J.A.C., Dierickx, W. 1978. Drainage materials. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Proceedings of the International Drainage Workshop, publication 25, pp. 14-38.

Kuntze, H. 1982. Iron clogging in soils and pipes, analysis and treatment. German Association for Water Resources and Land Improvement (DVWK), Bulletin 10, 123 p.

Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. 1982. Methods of soil analysis. Part 2 - Chemical and Microbiological Properties. Second Edition. Wisconsin USA. 1159 p.

Peltomaa, R. 1981. Salaojien ruoste - Mitä se on ja mitä se aiheuttaa? Käytännön Maamies 30, 5, ss. 54-55.

Peltomaa, R, Veijalainen, V. 1986. Ochre and subsurface drainage in Finland. American Society of Agricultural Engineers, Paper 81-2051, 11 p.

Perälä, T. 1987. Suullinen tiedonanto 27.10.1987.

Rathmayer, H.G. 1971. Kiesfilter für Tondröhre bei Fundamentenwässerungen. Valtion Teknillinen Tutkimuslaitos, tiedotus, sarja 3. Rakennus 165.

RIL 93. 1973. Vesihuolto. Helsinki 1973. 374 s.

Saavalainen, J. 1980. Salaoja ja suodatin. Käytännön Maamies 29, 11, ss. 28-29.

Saavalainen, J. 1983. Salaojittajan Käsikirja osa 1 B. Helsinki. 83 s.



Saavalainen, J. 1986. Finnish drainage construction practices. Proceedings of International Seminar on Land Drainage, TKK, Rakennusinsinööriosasto, Vesitekniikka, Otaniemi, pp. 1-15.

Schwab, G.O. 1986. Sediment inflow into pipe drains through synthetic envelopes and pin holes. Proceedings of International Seminar on Land Drainage, TKK, Rakennusinsinööriosasto, Vesitekniikka, Otaniemi, pp. 61-70.

Strandman, A. 1979. Erilaatuiset suodatinmateriaalit. Vesitalouden seminaari 1978-1979, TKK, Vesitekniikan laitos, julkaisu 15, ss. 99-134.

Stuyt, L.C.P.M., Cestre, T. 1986. Common lines in research on drainage envelopes in France and in the Netherlands. Institute for Land and Water Management Research, Technical Bulletins 41, pp. 163-173.

Suortti-Suominen, T, Mäenpää, O. 1982. Ruosteen torjunta meillä ja ulkomailla. Salaojittaja 1, s. 15.

Suortti-Suominen, T. 1982. Kookoskuitukankaan ominaisuudet salaojan ympärysaineena. Vesitalous 23, 6, ss. 14-22.

Suortti-Suominen, T. 1986. Selvitys salaojasoran laadusta Suomessa 1986. Helsinki, Salaojakeskus, moniste, 3 s. Julkaisematon.

Svobodova, V. 1981. Decomposition of organic drainfilters in soils. Scientia Agriculturae Bohemoslovaca 13, 2, pp. 107-118.

Tiainen, I. 1987. Salaojaputken ympärysaineet. Kirjallisuustutkimus, TKK, MR-osasto, Otaniemi, 32 s.

Vesi- ja ympäristöhallitus, 1987. Muovirakenteiden käyttö maanparannuksessa. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja no: 9, 123 s.

Willardson, L.S. 1978. Synthetic drain envelope materials. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Proceedings of the International Drainage Workshop, publication 25, pp. 297-305.

Vuorela, V. 1987. Suullinen tiedonanto 18.12.1987.