

# VESI- JA YMPÄRISTÖHALLITUKSEN MONISTESARJA

Nro 190

PELTOVILJELYN VAIKUTUS EROOSIOON

Ismo Tiainen  
Markku Puustinen




VESI- JA YMPÄRISTÖHALLITUKSEN MONISTESARJA

Nro 190

PELTOVILJELYN VAIKUTUS EROOSIOON

Ismo Tiainen  
Markku Puustinen

Vesi- ja ympäristöhallitus  
Helsinki 1989



Tekijät ovat vastuussa julkaisun sisällöstä, eikä siihen voida vedota vesi- ja ympäristöhallituksen virallisena kannanottona.

Julkaisua saa teknillisestä tutkimustoimistosta.

ISBN 951-47-2429-1  
ISSN 0783-3288

Painopaikka: Vesi- ja ympäristöhallituksen monistamo,  
Helsinki 1989

Julkaisija

Vesi- ja ympäristöhallitus

Julkaisun päivämäärä

10.6.1989

Tekijä(t) (toimielimestä: nimi, puheenjohtaja, sihteeri)

Ismo Tiainen

Markku Puustinen

Julkaisun nimi (myös ruotsinkielinen)

Peltoviljelyn vaikutus eroosioon

Julkaisun laji

Monistesarja

Toimeksiantaja

Toimielimen asettamispv

Julkaisun osat

Tiivistelmä

Tämän kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on ollut selvittää erilaisten viljelytapojen ja -menetelmien sekä kuivatuksen ja viljelykasvin vaikutusta eroosioon. Tutkimus liittyy vuonna 1988 maa- ja metsätalousministeriön asettamaan MAVERO-yhteistyöprojektiin, jonka tehtävänä on tutkia maatalouden aiheuttamaa vesistökuormitusta ja sen vähentämismahdollisuuksia.

Eroosio jää pieneksi Suomessa ilmaston ansiosta. Sademäärä jakautuu tasaisesti koko vuodelle ja sateen rankkuudet ovat pieniä. Suurimman osan eroosiosta aiheuttaa keväällä lumen sulamisen ja syksyllä sateiden synnyttämä pintavalunta. Sen suuruuteen vaikuttavat sademäärän lisäksi interseptio, painanne-säilyntä, haihdunta ja infiltraatio. Keväällä tärkeä suotatumiseen vaikuttava tekijä on roudan paksuus ja vedenläpäisevyys.

Pelloilta erodoitunut maa-aines ei vastaa laadultaan eikä määrältään vesistöön päätyvää ainesta, koska matkalla vesistöön osa partikkeleista sedimentoituu tai valumaveteen erodoituu lisää ainesta. Määrän ja laadun muutoksia kuvataan kulkeutumisen- ja rikastumiskertoimilla. Niiden arvot riippuvat mm. uoma-tiheydestä, pellon muodosta ja vesistön välisestä etäisyydestä ja kasvillisuudesta.

Pintavaluntaa voidaan säädellä kuivatuksella, muokkauksella ja kasvillisuudella. Maan eroosioherkkyys riippuu mm. tekstuurista ja struktuurista. Riittävän pieni tai iso partikkeli erodoituu vaikeimmin. Pienet partikkelit muodostavat tehokkaasti muruja, jotka eivät eroidu helposti. Lisäksi muruinen maa on kasvien kasvun kannalta ihanteellinen. Murujen syntyyn vaikuttavat routa, maalaji, pieneliöstön toimi-ta, juuristo ja orgaanisen aineksen määrä maassa. Isoja partikkeleita estää kulkeutumasta gravitaatio.

Asiasanat (avainsanat)

Eroosio, pintavalunta, maatalousperäinen vesistökuormitus, kiintoainehuuhtoutuma, fosforin huuhtoutuminen, suojaväyhyke

Muut tiedot

Sarjan nimi ja numero

Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja nro 190

ISBN

951-47-2429-1

ISSN

0783-3288

Kokonaissivumäärä

71

Kieli

Suomi

Hinta

Luottamuksellisuus

Jakaja

Vesi- ja ympäristöhallitus/teknillinen tutkimussto

Kustantaja

Vesi- ja ympäristöhallitus



## TIIVISTELMÄ

Pintavalunta ja sadepisaroiden iskut synnyttävät eroosiota. Vesieroosion suuruutta säätelevät tekijät voidaan jakaa sitä synnyttäviin voimiin ja niiden määrää ja tehoa sääteleviin olosuhteisiin. Toinen mahdollisuus on jakaa ne tekijöihin, joihin voidaan vaikuttaa ja joihin ei voida vaikuttaa. Eri tekijöiden keskinäisen tärkeyden määrittäminen on hankalaa, koska ne vaikuttavat toisiinsa.

Eroosio jää pieneksi Suomessa ilmaston ansiosta. Sademäärä jakautuu tasaisesti koko vuodelle ja sateen rankkuudet ovat pieniä. Suurimman osan eroosiosta aiheuttaa keväällä lumen sulamisen ja syksyllä sateiden synnyttämä pintavalunta. Sen suuruuteen vaikuttavat sademäärän lisäksi interseptio, painannesäilyntä, haihdunta ja infiltraatio. Keväällä tärkeä suotautumiseen vaikuttava tekijä on roudan paksuus ja vedenläpäisevyys. Lounais-Suomessa peltoeroosion on arvioitu olevan suurimmillaan n. 7 t/ha a. Globaalissa luokituksessa määrää pidetään pienenä.

Pelloilta erodoitunut maa-aines ei vastaa laadultaan eikä määrältään vesistöön päätyvää ainesta, koska matkalla vesistöön osa partikkeleista sedimentoituu tai valumaveden erodoituu lisää ainesta. Määrän ja laadun muutoksia kuvataan kulkeutumis- ja rikastumiskertoimilla. Niiden arvot riippuvat mm. uomatiheydestä, pellon muodosta, pellon ja vesistön välisestä etäisyydestä ja kasvillisuudesta.

Eroosion määrää ja nopeutta voidaan arvioida mm. vaaituksen, norojen tilavuuden, valumaveden kiintoainespitoisuuden tai radioaktiivisten isotooppien avulla. Näistä yleisin tapa on valumaveden kiintoaineskonsentraation määrittäminen. Menetelmällä voidaan arvioida koko valuma-alueella tai yksittäisellä koekentällä tapahtuvaa eroosiota.

Pintavaluntaa voidaan säädellä kuivatuksella, muokkauksella ja kasvillisuudella. Maan eroosioherkkyys riippuu mm. tekstuurista ja struktuurista. Riittävän pieni tai iso partikkeli erodoituu vaikeimmin. Pienet partikkelit muodostavat tehokkaasti muruja, jotka eivät eroidu helposti. Lisäksi muruinen maa on kasvien kasvun kannalta ihanteellinen. Murujen syntyyn vaikuttavat routa, maalaji, pieneliöstön toiminta, juuristo ja orgaanisen aineksen määrä maassa. Isoja partikkeleita estää kulkeutumasta gravitaatio.

Salaojitus on osoittautunut tehokkaaksi keinoksi pienentää eroosiota. Eri muokkausmenetelmien vaikutus eroosioon vaihtelee. Erot johtuvat pääasiassa niiden vaikutuksesta maan rakenteeseen ja korjuujäännöspeittoon. Suorakylvö ja suojamuokkaus pienentävät poikkeuksetta eroosiota kyntöön verrattuna. Kyntösuunnan muuttaminen kaltevuuteen nähden poikittaiseksi lisää maan painannevarastotilaa. Tämä vähentää pintavaluntaa ja eroosio pienenee. Kasvillisuus vähentää eroosiota suojaamalla maata pisaroiden iskuilta, sitomalla sitä juurilla ja parantamalla sen rakennetta. Erot eri kasvien antaman suojan välillä ovat suuria.

Fosfori on merkittävä suomalaisia järviä rehevöittävä ravinne. Kuormitus on sidoksissa eroosioon, koska fosfori sitoutuu hienoainekseen. Tästä syystä samat keinot, joilla vähennetään eroosiota, pienentävät fosforikuormitusta. Myös lannoitteen sekoittaminen maahan alentaa kulkeutumista. Suomessa fosforin sitoutumista tehostaa hapan maaperä. Lannoituksesta johtuen sitä on varastoitunut maaperään suuria määriä. Maan kalkituksella voidaan joissain tapauksissa lisätä käyttökelpoisen fosforin määrää maassa, mutta vesistökuormituksen kannalta vaikutus voi olla negatiivinen. Suojamuokkauksessa pellon pinnalle jätetyt kasvinosat vapauttavat toistuvan sulamisen ja jäätyksen seurauksena runsaasti fosforia.

Hajakuormituksen arvioimiseksi on kehitetty lukuisa joukko malleja. Rakenteeltaan ne ovat hydrologisia kuvauksia, joihin on liitetty vedenlaatuksikomponentit. Suomessa on toistaiseksi kokeiltu vain USA:laista CREAMS-mallia, mutta sen käyttökelpoisuutta olosuhteisiimme ei ole osoitettu. Mallintamisen lisäksi hajakuormitustutkimusta on tehty maassamme melko vähän. Eri maissa suoritettujen tutkimusten vertailu ja tulosten soveltaminen Suomeen on hankalaa. Tämä johtuu erilaisista olosuhteista, tutkimustavoista ja päämääristä.

## ALKUSANAT

Maatalouden merkitys vesistöjen kuormittajana on viime vuosina kasvanut. Pääosin tämä on johtunut siitä, että teollisuuden ja yhdyskuntien kuormituspäästöjä on pystytty tehokkaasti vähentämään, kun samaan aikaan maatalouden aiheuttama hajakuormitus on pysynyt ennallaan. Siten huoli vesistöjen ja pohjavesien tilasta on kääntänyt katseet maatalouden suuntaan.

Vuonna 1988 maa- ja metsätalousministeriö asetti laajan MAVERO-yhteistyöprojektin, jonka tehtävänä on tutkia maatalouden vesistökuormitusta ja sen vähentämismahdollisuuksia. Projekti toteutetaan yhteistyönä MMM:n, YM:n, VYH:n, MTTK:n, Kemira Oy:n, MTK:n ja Salaojakeskuksen kanssa. Projektin tutkimukset tehdään eri tutkimuslaitoksissa, yliopistoissa ja korkeakouluissa.

Pelloillamme tapahtuva eroosio on noussut erääksi keskustelun aiheeksi vesistöjen kuormituksen yhteydessä. Tämä johtuu siitä, että vesistöjen eräs keskeisimmistä kuormittajista eli fosfori kytkeytyy vahvasti juuri eroosioon. Tämän ongelman vähentämiseksi on esitetty erilaisia ratkaisuja, mm. suojavyöhykkeiden käyttöä. Tutkimustietoa oloistamme tässä suhteessa ei kuitenkaan ole ollut toistaiseksi saatavissa.

Vuoden 1988 lopulla valmistui Aura-joen varteen koekenttä, jossa selvitetään viljelytekniikan ja muokkaustapojen merkitystä eroosioon ja fosforin huuhtoutumiseen. Myös suojavyöhykkeiden merkitys kuormituksen vähentäjänä on mukana tässä tutkimuksessa. Luonteestaan johtuen tutkimus tulee kestämään usean vuoden ajan.

Osana em. tutkimusta on tehty tämä kirjallisuustutkimus. Tarkoituksena on katsoa mitä muualla on tehty ja millaisin tuloksin. Selvityksen pääpaino on viljelytekniikassa ja sen mahdollisuuksissa vähentää maatalouden hajakuormitusta, erityisesti fosforikuormitusta.

Selvityksen on laatinut tekn. yo. Ismo Tiainen.

Helsingissä 24.2.1989

Agr. Markku Puustinen  
Vesi- ja ympäristöhallitus



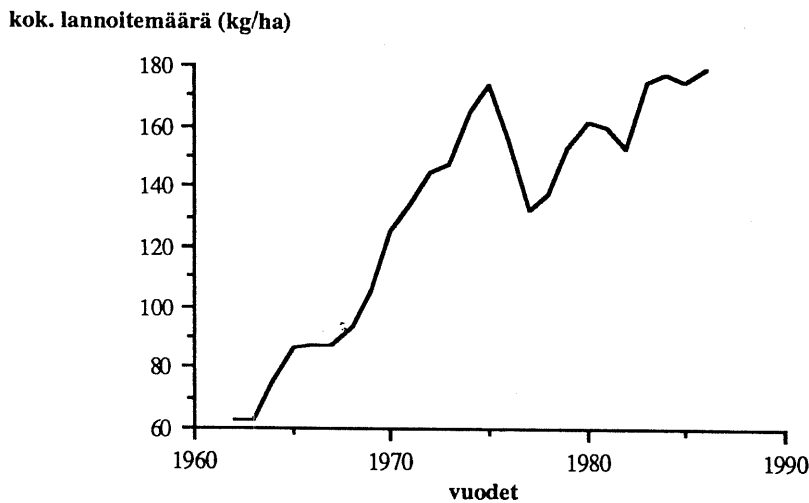
# SISÄLLYS

	SIVU
TIIVISTELMÄ.....	3
ALKUSANAT.....	4
1. JOHDANTO.....	7
2. EROOSIO- JA KIINTOAINEEN KULKEUTUMISLAJIT.....	9
2.1 Pintaerosio.....	9
2.2 Noro- ja uomaerosio.....	10
2.3 Piiloerosio.....	10
2.4 Kiintoaineen kulkeutuminen.....	11
3. EROOSION MITTAUS.....	15
3.1 Määrä ja nopeus.....	15
3.1.1 Vaaitus.....	15
3.1.2 Norojen tilavuuden mittaus.....	15
3.1.3 Veden kiintoainespitoisuuden mittaus.....	16
4. EROOSIOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	18
4.1 Hydrologia.....	19
4.1.1 Sadanta.....	19
4.1.2 Valunta.....	22
4.1.2.1 Pintavaluntaan vaikuttavat tekijät.....	22
4.2 Morfologia.....	28
4.3 Maaperä.....	31
4.4 Pellon pinta.....	33
4.4.1 Muokkaus.....	33
4.4.1.1 Menetelmät.....	34
4.4.1.2 Muokkaussuunta.....	37
4.4.1.3 Muokkauksen vaikutus sedimentin kokojakaumaan.....	38
4.4.1.4 Vaikutuksen muuttuminen.....	40
4.4.2 Kasvipeitto.....	41
4.5 Kuivatustapa.....	43
4.6 Johtopäätökset.....	44
5. FOSFORIKUORMITUS.....	47
5.1 Määrä ja sitoutuminen.....	47
5.2 Kulkeutuminen.....	49
5.3 Johtopäätökset.....	52
6. EROOSION JA FOSFORIKUORMITUKSEN MALLINTAMINEN...	54
6.1 Eroosio.....	55
6.1.1 USLE-yhtälö.....	56
6.1.2 Negevin yhtälö.....	58
6.1.3 Sedimenttikuormituksen laskeminen.....	59
6.2 Fosforikuormitus.....	60
6.2.1 Sitoutuminen.....	60
6.2.2 Kulkeutuminen.....	61
6.2.3 Liukaisen fosforikuorman laskeminen.....	63

7.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET.....	64
	LÄHDELUETTELO.....	67

## 1. JOHDANTO

Hajakuormituksen vesistövaikutukset ovat viime aikoina korostuneet keskitetyn asutuksen ja teollisuuden aiheuttaman kuormituksen pienentyessä. Suurin hajakuormituksen aiheuttaja on maatalous, erityisesti peltoviljely. Pyrkimys parantaa peltojen tuottavuutta on lisännyt lannoitteiden käyttöä, vuodesta 1962 vuoteen 1986 määrä on miltei kolminkertaistunut. V. 1987 lannoituksen kokonaismäärät olivat 215 milj. kg typpeä, 69 milj. kg fosforia ja 126 milj. kg kaliumia (Anon. 1988).



Kuva 1. Lannoitusmäärien kehitys Suomessa (Anon. 1988).

Yksipuolinen viljanviljely, tehokkaat ja painavat koneet sekä voimakas maanmuokkaus kuluttavat ja tiivistävät maata. Tehokas kuivatus estyy, maa liettyy, ja kiintoainesta sekä siihen sitoutuneita ravinteita kulkeutuu pois pelloilta. Mansikkaniemi (1982) on arvioinut eroosion olevan Lounais-Suomen savisilla rinnepelloilla suurimmillaan 7 t/ha a. Zacharin (1982) esittämässä globaalissa luokituksessa määrä sijoittuu vähäisen eroosion ryhmään. Maan köyhtyessä sitä lannoitetaan enemmän ja ravinnehuuhtoutumat kasvavat. Vesistöjemme kokonaiskuormituksesta on viljelyn osuus fosforin osalta n. 60 % (1400 t/a) ja typen osalta n. 62 % (31000 t/a) (Kauppi 1979; Seppänen 1987). Numeroarvoja tarkasteltaessa on kuitenkin muistettava haja- ja pistekuormituksen erilaisuus.

Kaupin (1984) mukaan fosfori on useimmissa suomalaisissa järvissä ensisijaisesti tuotantoa rajoittava ravinne. Sen reaktiot maassa ja kulkeutuminen pelloilta vesistöön poikkeavat typen vastaavista prosesseista. Fosforin kulkeutuminen on sidoksissa maa-aineksen eroosioon, sillä se liikkuu suurimmaksi osaksi maapartikkeleihin sitoutuneena maan pinnalla. Typpi puolestaan liukenee veteen ja joutuu sitä kautta pohja- ja pintavesiin. Tämä tutkimus rajoittuu tarkastelemaan pelkästään eroosiota ja fosforin kulkeutumista.

Esityksen alussa on kuvattu Suomessa pelloilla vaikuttavia vesieroosioprosesseja ja niihin vaikuttavia tekijöitä sekä eroosion mittausta. Fosforin kulkeutumisen ymmärtämiseksi on esitetty yleisesti sen kierron perusteet. Lopuksi on pyritty antamaan yleiskuva eroosion ja fosforin kulkeutumisen mallintamisesta.

## 2. EROOSIO- JA KIINTOAINEN KULKEUTUMISLAJIT

Vesieroosioprosessi jakautuu maapartikkeleiden irtoamiseen ja kulkeutumiseen sadepisaroiden ja valunnan vaikutuksesta. Irtoamisella tarkoitetaan partikkeleiden siirtymistä pois tavanomaiselta paikaltaan maamassasta ympäröivien partikkeleiden sitomisvoimien vaikutuspiiristä. Koheesiomaissa, kuten esim. savessa, primääripartikkeleita sitovat toisiinsa fysikaaliset ja kemialiset voimat, mutta koheesiottomassa maassa partikkeleihin vaikuttavat vain gravitaatio ja kitka. Esimerkiksi löyhässä hiekassa partikkelit ovat jo valmiiksi irtonaisia ja voima, joka tarvitaan siirtämään niitä on paljon pienempi verrattuna voimaan, jolla koheesiomaan partikkelit lähtevät liikkeelle. Maa-aineksen irtoaminen, kulkeutuminen ja sedimentoituminen ovat riippuvaisia toisistaan. Veden kuljetuskapasiteetilla tarkoitetaan sitä suurinta sedimenttimäärää, jonka vesi pystyy kuljettamaan. Jos veden sedimenttikuorma ylittää kuljetuskapasiteetin, tapahtuu sedimentoitumista. Eroosiota voi tapahtua vain, jos veden hienoainespitoisuus on sen kuljetuskapasiteettia pienempi (Foster et al. 1985).

### 2.1 Pintaeroosio

Teoriassa pintaeroosio (*sheet erosion*) tarkoittaa prosessia, jossa maan pinnalla ohuena patjana virtaava vesi irrottaa maahiukkasia mukaansa. Tämä on mahdollista hyvin löyhällä ja tasaisella maalla, kun veden virtaus on turbulenttista. Käytännössä pintaeroosiota edellä kuvatulla tavalla tapahtuu kuitenkin hyvin vähän (FAO 1978). Zachar (1982) kutsuu kaltevalla pinnalla ohuena kerroksena hitaasti virtaavan veden aiheuttamaa kulutusta laminaarioosioksi (*laminar erosion*). Vesi pystyy irrottamaan ja kuljettamaan vain hienoimpia partikkeleja, mistä syystä ilmiötä nimitetään myös valikoivaksi eroosioksi (*selective erosion*).

Todellisuudessa pintaeroosio muodostuu useista eri eroosiolajeista. Sadepisaran iskeytyessä maahan tai sen pinnalla olevaan ohueen vesikerrokseen se irrottaa ja lajittelee maapartikkeleita (*splash erosion*) (Linsley et al. 1975; Schwab 1981 et al.; Marshall & Holmes 1981). Tasaisella maalla maahiukkaset sinkoutuvat satunnaisesti eri suuntiin, mutta kaltevassa maastossa tapahtuu nettosiirtymistä rinnettä alas. Dispersiotuotteet kulkeutuvat pintakerroksen huokosiin ja muodostavat yhdessä sadepisaroiden tiivistävän vaikutuksen kanssa maanpinnalle ohuen, huonosti vettä läpäisevän kerroksen. Myös maan kyllästyminen ja jäätyminen hidastavat veden suotautumista. Sateen intensiteetin ylittäessä infiltraationopeuden syntyy pintavaluntaa, joka kuljettaa pisaroiden irrottamia maapartikkeleita (Linsley et al. 1975; Zachar 1982). Tätä aiheuttaa myös lumen nopea sulaminen keväällä. Valumaveden hiukkasten kuljetuskyky moninkertaistuu sadepisaroiden energian synnyttämän turbulenssin vaikutuksesta (FAO 1978; Marshall & Holmes

1981; Bennett 1955). Pellon painaumat keräävät sadevettä, joka veden pinnan noustessa alkaa lopulta virrata reunan matalimman kohdan yli seuraavaan painaumaan. Prosessin jatkuessa muodostuu painaumien välille pieniä, vaikeasti havaittavia puroja, joissa tapahtuu nk. mikrokanavaeroosiota (*microchannel erosion*) (Schwab et al. 1981; Foth 1984; FAO 1978). Tunnusomaista mikrokanaville on mutkittelu ja jatkuva muodon muuttuminen. Jos kanavien syvyys ja leveys pysyvät pieninä, näyttävät vesi ja sen mukana kulkeutuva aines liikkuvan tasaisena kerroksena koko alueella. Tästä syystä yleensä puhutaankin pelkästään pintaeroosiosta. Kuitenkin mikrokanavaeroosio on huomattavasti tehokkaampaa puhtaaseen pintaeroosioon verrattuna lähinnä veden suuremman virtausnopeuden johdosta (FAO 1978).

## 2.2 Noro- ja uomaeroosio

Pintavalunnan kasvaessa ja keskittyessä painaumiin mikrokanavat laajenevat helpommin havaittaviksi noroiksi. Veden niissä aiheuttamaa kulutusta kutsutaan noroeroosioksi (*rill erosion*). Selvää rajaa norojen ja mikrokanavien välille ei ole määritelty, ja usein puhutaan pelkästään noroista tarkoittaen niitä molempia. Tällä perusteella noroeroosion voitaisiin katsoa kuuluvan myös pintaeroosioon. Vaikka norot ovat kooltaan niin pieniä, että ne voidaan poistaa normaaleilla muokkaustoimenpiteillä, noroeroosio on kaikkein tehokkain eroosiolaji (Schwab et al. 1981). Jos virtaaman turbulenssi on riittävän voimakas, kasvaa noro uomaksi. Se eroaa norosta kokonsa puolesta, sitä ei enää pystytä peittämään muokkauksella. Luonnonuomaa kuluttavia voimia kutsutaan yhteisesti rotkoeroosioksi (*gully erosion*) (Foth 1984). Siihen luetaan kuuluvaksi oja- ja vesiputouseroosiot (*channel erosion* ja *waterfall* tai *stream bank erosion*) (Schwab et al. 1981; Foth 1984). Edellisessä vaikuttavina voimina ovat sadepisarat ja veden virtaus, jälkimmäisessä ilmiössä uoman alkukohta siirtyy ylävirtaan virtauksen kuluttaessa ojan pengertä, jota myös vuorottainen jäätyminen ja sulaminen murentavat. Ojaeroosiolla tarkoitetaan myös virtaavan veden ja sadepisaroiden aiheuttamaa kaivetun uoman kulumista. Yleensä ojaeroosiota tapahtuu sellaisessa uomassa tai uoman kohdassa, jossa veden virtaus on jatkuvaa ja gradientiltaan pientä, kun taas vesiputouseroosiota synnyttävä virtaus on epäsäännöllistä (Schwab et al. 1981).

## 2.3 Piiloeroosio

Maaveden virtauksen synnyttämää eroosiota nimitetään piiloeroosioksi (*crypto erosion*). Se voidaan jakaa kolmeen eri alalajiin, maan sisäiseen (*intrasoil erosion*), tunneli- (*tunnel erosion*) ja karstieroosioon (*karst erosion*) (Zachar 1982). Suomessa lienee merkitystä vain maan sisäisellä eroosiolla. Sillä tarkoitetaan ilmiötä, jossa gravitaation

vaikutuksesta nopeasti maahan suotautuva vesi kuljettaa pintakerroksista irronneita partikkeleita mukanaan. Prosessi on yleinen alueilla, joilla sora- tai kivimaan päältä on poistettu suojaava kasvipeite. Tunnelieroosioksi nimitetään ilmiötä, jossa maaveden virtaus synnyttää käytävän maan sisään. Sitä esiintyy alueilla, joilla lössimaa on tiiviin maa-kerroksen päällä. Ajan myötä tunneli kehittyi rotkoksi. Tunnelieroosio synnyttää joskus karstimaata muistuttavia alueita. Kuluttavia voimia kutsutaan tällöin karstimaeroosioksi ja syntyneitä alueita valekarstimaaksi (*sham karst, pseudo karst*). Kivityypin perusteella siitä voidaan erottaa useita eri alalajeja.

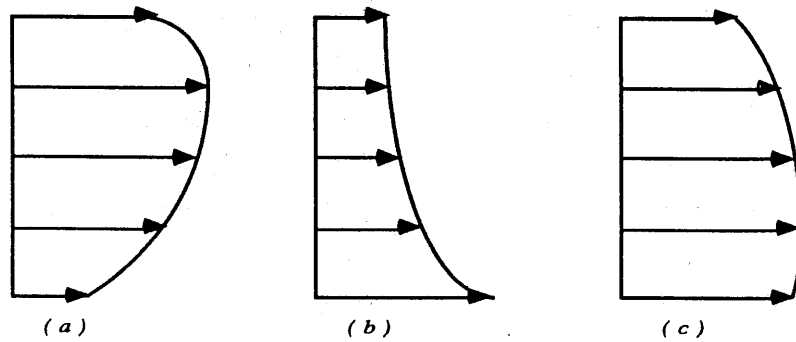
## 2.4 Kiintoaineen kulkeutuminen

Hienorakeisin osa pintavalunnan mukana vesistöön päätyneestä kiintoaineesta kulkeutuu virran mukana suspensiona (*wash load*). Suspendoituneet maapartikkelit kulkevat virtaavassa vedessä saostumatta uoman pohjalle. Partikkeleiden laskeutumisenopeuden ja halkaisijan välinen yhteys selviää taulukosta 1.

Taulukko 1. Maapartikkeleiden laskeutumisenopeudet seisovassa vedessä, jonka lämpötila on 10 °C. Partikkeleiden tiheys on 2.65 g/cm<sup>3</sup>

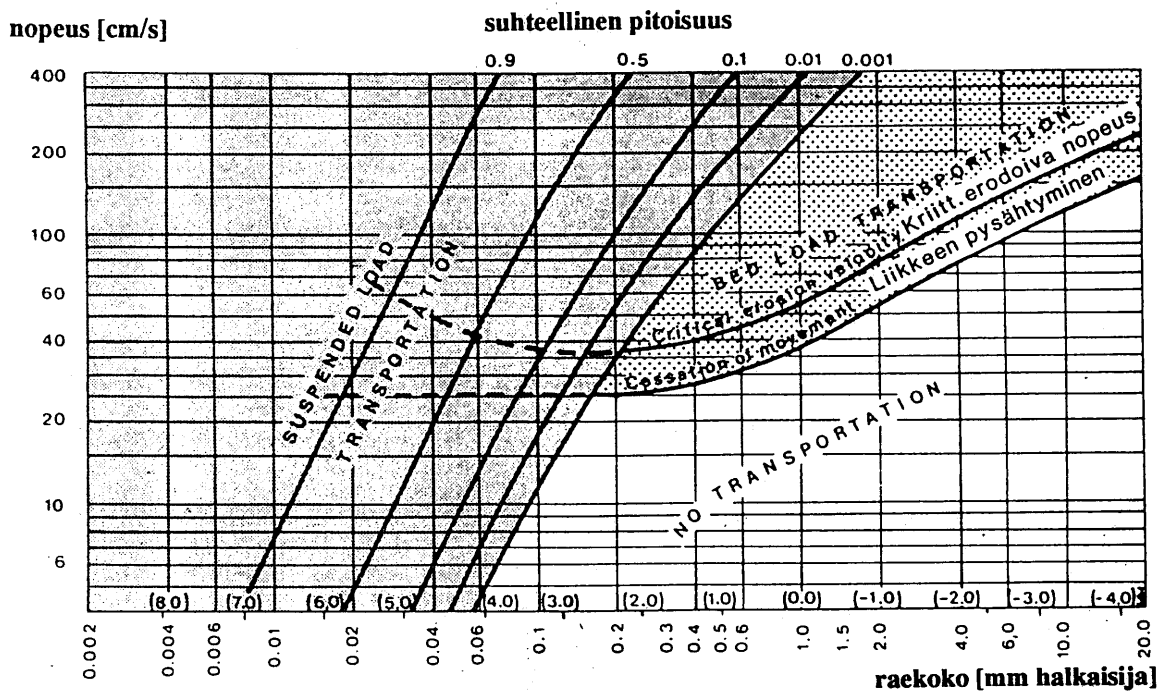
.....partikkelin..... laji	halkaisija [mm]	laskeutumis- nopeus [mm/s]	laskeutumis- aika 1m kohden
sora	10.0	1000	1 s
	0.8	83	12 s
hiekkä	0.6	63	16 s
	0.08	6	167 s
hieta	0.06	3.8	263 s
	0.008	0.08	3 h
hiesu	0.006	0.065	4 h
	0.002	0.0062	45 h
savi	0.0015	0.0035	79 h
	0.0001	0.0000154	750 d
kolloidit	0.00001	0.000000154	205 a

Veden virtausnopeus on kitkan takia pienin uoman pohjalla, mutta vastaavasti hienoainekonsentraatio siellä on suurin. Tästä syystä suurin osa kulkeutuvasta maa-aineksen kokonaisuudesta liikkuu pohjan lähellä (kuva 2). Hienoaineksen pitoisuusjakauma on vertikaalisuunnassa tasaisempi karkeaan ainekseen verrattuna (Schwab et al. 1981).



Kuva 2. Veden virtausnopeuden (a), hienoainekonsentraation (b) ja kulkeutuvan hienoaineksen kokonaismäärän (c) jakautuminen suoran luonnonuoman keskellä vertikaalisuunnassa (Schwab et al. 1981).

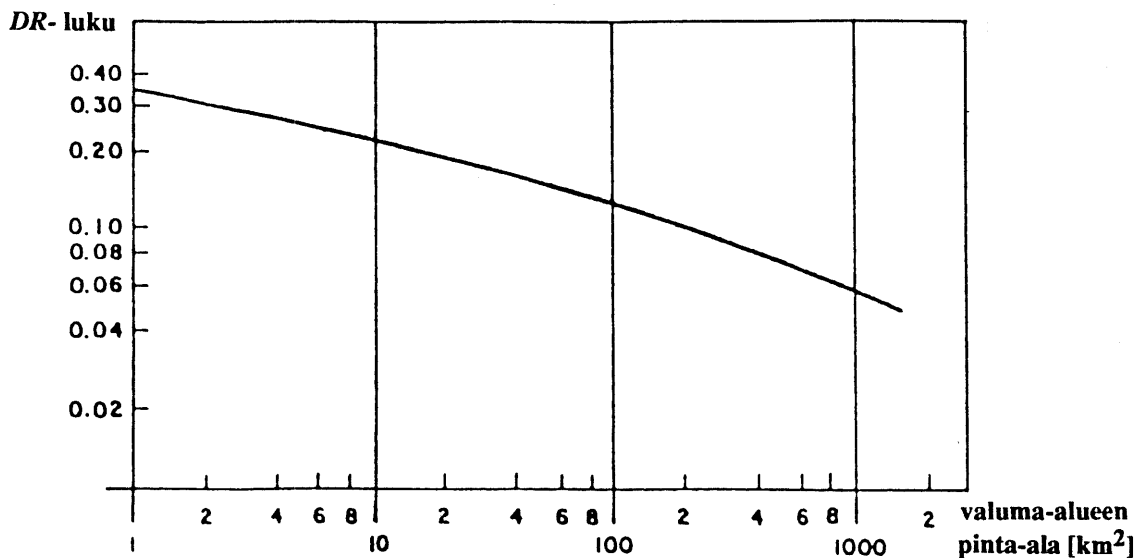
Sedimentin suurimmat rakeet kulkeutuvat uoman pohjaa pitkin liukumalla (*bed load*) tai hyppäyksin ja vierien (*contact load, saltation*). Yhdessä uoman poikileikkauksessa suspensiona oleva materiaali saattaa toisessa poikkileikkauksessa liikkua pohjakulkeutumana tai kasaantua paikoilleen. Kulkeutumiseen vaikuttavat partikkeleiden ominaisuuksien ohella virtauksen nopeus ja turbulentsisuus, uoman tasaisuus, virtauksen esteet ja kuljettavissa olevan materiaalin määrä (Linsley et al. 1975; Schwab et al. 1981). Sundborg (1967, ref. Salo et al. 1985) esittää kaaviolla maapartikkeleiden irtoamisen, kulkeutumisen, sedimentoitumisen ja partikkelikoon sekä virtausnopeuden välisen yhteyden (kuva 3). Sen mukaan helpoimmin irtoaa aines, jonka halkaisija on n. 0.2 mm. Partikkeleiden irtoamisherkkyys vähenee sekä tätä pienempiin että suurempiin kokoihin siirryttäessä, mutta niiden kulkeutuminen veden mukana helpottuu koon pienetessä.



Kuva 3. Aineksen irtoaminen, kulkeutuminen ja sedimentoituminen raekoon ja virtausnopeuden suhteen. Harmaa alue kuvaa suspensio kulkeutumista, pisteytetty alue pohjakulkeutumista ja valkoisella alueella ei tapahdu kulkeutumista (Sundborg 1967, ref. Salo et al. 1985).



Vesistöön päätyneet eroosioainekset eivät vastaa määrältään eikä laadultaan pelloilta erodoitunutta maata, koska matkalla pelloilta vesistöön valumavedestä saattaa sedimentoitua tai siihen voi erodoitua maa-ainesta. Sedimentin kulkeutumista kuvaa *DR* -luku (*delivery ratio*), jolla tarkoitetaan yleensä vuositason pelloilta vesistöön asti päätyvän ja pellolla erodoituneen maamäärän suhdetta (Mills et al. 1985). Teoriassa sen arvot vaihtelevat välillä 0...1, mutta käytännössä uomaerosiosta johtuen se voi saada suuren virtausnopeuden vallitessa korkeampiakin arvoja. Esimerkiksi Pekkarinen (1979) arvioi diplomityössään ojaerosion suuruutta 400 m pituisessa savimaahan kaivetussa ojassa, jonka virtaama oli n. 50 l/s. Veden kiintoainespitoisuus kasvoi kyseisellä matkalla arvosta 83 mg/l arvoon 176 mg/l, eli peräti 112 %. Ainoastaan ojassa virtaavalla vedellä oli eroosion kannalta merkitystä. *DR* -lukuun vaikuttavat uomaerosion lisäksi pellon etäisyys vesistöstä, kasvillisuusvyöhykkeet sekä maaston kaltevuus ja epätasaisuus. Isonkaan pellon merkitys vesistön sedimenttikuoormittajana ei ole suuri, jos se sijaitsee kaukana vesistöstä. Maanpäällisen valunnan kuljetuskapasiteetti on rajallinen ja tästä syystä hienoimman aineksen *DR* -luku on suurempi karkeaan ainekseen verrattuna. Kuvassa 4 on esitetty valuma-alueen koon ja *DR* -luvun välinen yhteys Vanonin (1975) tulosten perusteella (ref. Mills et al. 1985).

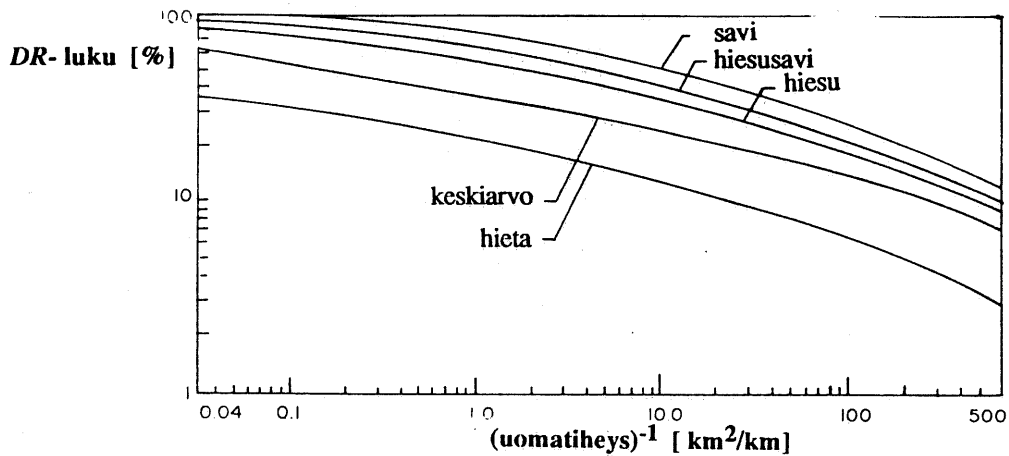


Kuva 4. *DR* -luvun ja valuma-alueen pinta-alan välinen yhteys (Vanoni 1975, ref. Mills et al. 1985).

Uomatiheyden kasvu merkitsee sitä, että pintavalunnalla on lyhyempi matka kuljettavanaan uomaan. Näinollen suurempi määrä sedimentistä päätyy virran kuljetettavaksi (kuva 5). Lisäksi uomaerosiossa syntyvä aines voi välittömästi kulkeutua virran mukana, kun taas pintaerosiossa irronnut aines kulkee valuman mukana lyhyitä matkoja välillä sedimentoituen.

*DR* -luvun tarkka ennustaminen on osoittautunut miltei mahdottomaksi, koska selvää yhteyttä eroosion ja purkautuvan sedimenttimäärän välillä ei ole olemassa. Erityisen hankalaa sen määrittäminen on lyhyillä ajanjaksoilla esim. yksittäisen valuntatapahtuman

yhteydessä, mutta vuositasolla voidaan päästä tyydyttäviin tuloksiin (Novotny & Chesters 1981).



Kuva 5. Uomatiheyden käänteisluvun ja *DR* - luvun välinen yhteys eri maalajeilla (Novotny & Chesters 1981).

Eroosiomateriaalissa tapahtuvaa hienoaineksen suhteellisen pitoisuuden kasvua alkuperäiseen maa-ainekseen verrattuna kuvaa rikastumisluku *ER*, joka määritellään ko. ainesosan, esim. eroosioaineksen savipitoisuuden suhteena alkuperäisen maan savipitoisuuteen. Rikastuminen johtuu siitä, että keveintä ja hienointa materiaalia erodoituu kaikkein eniten sekä siitä, että raskaimmat partikkelit sedimentoituvat pintakerrosvalumasta ja uomavirtauksesta kaikkein helpoimmin. Hienoaineksen *DR*- ja *ER* - lukujen välillä vallitsee selvä yhteys: valuma-alueen koon kasvaessa huuhtoutuvan aineksen *DR* pienenee ja vastaavasti *ER* kasvaa (Mills et al. 1985).

### 3. EROOSION MITTAUS

Eroosiotutkimus voidaan jakaa tavoitteiden perusteella eroosion määrän ja intensiteetin, maaperän erodoituvuuden sekä vaikutusten tutkimiseen. Tässä on keskitytty vain määrän ja nopeuden mittaukseen noudatellen Zacharin (1982) esitystä.

#### 3.1 Määrä ja nopeus

Eroosion nopeus saadaan selville mittaamalla tiettyä ajanjaksona erodoituneen maan määrä. Se voidaan ilmaista paino- tai tilavuusyksiköissä tai pintakerroksen ohenemisena pituusyksiköissä aikayksikköä kohden. Tutkittaessa pitkän ajanjakson topografian muutoksia voidaan turvautua vanhoihin tilastoihin, ilmakuviin, karttoihin ja muihin dokumentteihin sekä maakerroksiin. Eri maalajien ja alueiden eroosiointensiteetin vertailulla voidaan päätellä esim. rinteiden muodon, kaltevuuden, pituuden, sijainnin ja korkeuden sekä uomien muotojen, leveyksien, pituuksien ja määrän tai kyntöalan osuuden vaikutus eroosion suuruuteen. Parhaiten tekijöiden vertailu onnistuu laboratorioissa häiriintymättömällä maanäytteellä, mutta kasvien ja viljelytoimenpiteiden vaikutusta on tällöin hankala tutkia. Ensimmäisen kerran häiriintymättömiä näytteitä, joiden koko oli  $80 \times 80 \times 25 \text{ cm}^3$ , käytti Saksalainen Wollny 1895.

##### 3.1.1 Vaaitus

Eroditun maamäärä saadaan selville mittaamalla maanpinnan vertikaalisuntainen muutos joko optisen vaaituslaitteen tai pelkästään kiinteiden mittapisteiden avulla. Kiintopisteinä voivat olla esim. metsän tai niityn reuna, puut, kivet, maahan lyödyt tapit tai niiden väliin pingotettu naru. Korkeuseron perusteella lasketun eroosiomäärän tarkkuus riittää vain pitkäaikaisten muutosten ilmaisemiseen, koska maan kosteuspitoisuuden ja lämpötilan muutokset sekä viljelytoimet aiheuttavat tuloksiin virhettä. Osa virheistä voidaan eliminoida tekemällä mittaukset aina samaan vuodenaikaan, mutta esim. kuivatuksen aiheuttamien painumien huomioiminen on hankalaa.

##### 3.1.2 Norojen tilavuuden mittaus

Erodituneen maan määrää voidaan karkeasti arvioida mittaamalla norojen ja rotkojen tilavuuksia mitan tai mallineen avulla. Koska norojen muoto muuttuu hyvin nopeasti, ei kiinteän mittauslaitteiston käyttö ole mahdollista. Koko alueen eroosiomäärän arviointi suoritetaan jakamalla se osiin, joista määritetään norojen yhteistilavuus. Tilavuuden,

pinta-alan ja maan ominaispainon avulla saadaan selville erodoituneen maamäärän paino pinta-alayksikköä kohden. Menetelmän etuna on sen nopeus, yksinkertaisuus ja edullisuus; eroosiomäärä voidaan selvittää heti rankkasateen jälkeen ilman hankalia ja kalliita ennakkovalmisteluja. Metodi sopii osaksi suuren alueen eroosiotutkimusta, mutta sellaisenaan sillä saadut tulokset ovat vain suuntaa antavia. Norojen välissä tapahtuvan eroosion jättäminen pois laskelmista aiheuttaa tulokseen 10...30 % virheen. Lisäksi rankkasateiden aikana norojen poikkileikkauksien dimensiot ovat epämääräiset, mikä vaikeuttaa niiden tilavuuden määrittystä. Norojen tilavuuden mittaaminen on haitoistaan huolimatta korvaamaton menetelmä eroosioprosessin vaiheiden arvioimisessa rinteiden eri kohdilla.

### 3.1.3 Veden kiintoainespitoisuuden mittaus

Sateen ja lumen sulamisen synnyttämän pintavalunnan erodoiman maa-aineksen laatu ja määrä sekä niiden avulla eroosion nopeus ja etenemisvaihe saadaan selville suodattamalla maa-aines vedestä ja analysoimalla se. Näytteitä voidaan kerätä sekä siirrettävillä että kiinteillä laitteilla. Edellisessä menetelmässä tietyn tilavuuksinen keräysastia asetetaan pellolle siten, että valumavedet virtaavat siihen. Astian pohjalla on tyhjennysputki, jonka avulla näytteet johdetaan pulloihin. Kun pullojen täyttymisaika ja valuman kokonaisaika tunnetaan, voidaan valuman määrä laskea, ja määrittämällä veden hienoainespitoisuus saadaan selville sedimentin virtausmäärä. Siirrettävän näytteenottimen etuna on sen nopeus ja tarkoituksenmukaisuus; mittauksia voidaan suorittaa juuri siellä, missä niitä tarvitaan ja juuri tiettyjen viljelytoimenpiteiden aikana normaalissa viljelyksessä olevalta pellolta. Tulosten epätarkkuuden takia se soveltuu vain alustaviin tutkimuksiin.

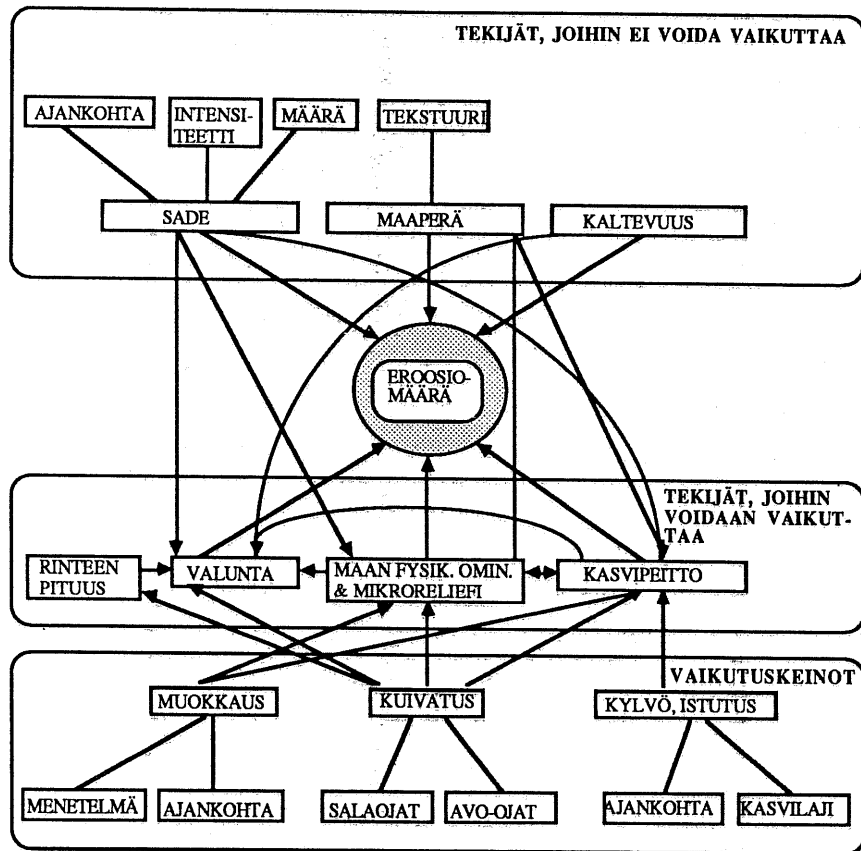
Kiinteillä tutkimuskäyttöön rakennetuille koekentille asennetuilla mittayksiköillä saadaan siirrettäviin mittalaitteisiin verrattuna tarkempia tuloksia. Niiden avulla voidaan helposti tutkia sadannan, valunnan, viljelyn, pinnanmuotojen yms. tekijöiden vaikutusta peltojen eroosioon. Mittayksikkö sijaitsee tutkimuspellon alalaidassa siten, että valumavedet päätyvät sinne. Täydelliseen mittaussyksikköön kuuluu laskeutusaltaiden lisäksi limnigrafi, meteorologisia mittalaitteita sekä maankosteuden mittari. Koekentältä saataviin tuloksiin on suhtauduttava kriittisesti, koska pintavaluma rajoitetulla pellolla ei tapahdu samalla tavoin kuin luonnonoloissa. Maastomuotojen vaikutus valumaan ja sen synnyttämään eroosioon on hyvin monimutkainen, eikä sitä pystytä tutkimaan lyhyillä koepelloilla. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä pienempi koevaluma-alue on, sitä virheellisempiä tuloksia siitä saadaan. Normaalisti koekenttien leveydet ovat vaihdelleet 3...10 m ja pituudet 10...40 m (Mutchler et al. 1988; Gilley et al. 1987; Dickey et al. 1983, 1984; Dezman et al. 1987; Andraski et al. 1985). Musokhranov (1976, ref. Zachar 1982) päätteli tulostensa perusteella, että koepeltojen tulisi olla vähintään 25 m leveitä ja 600 m pitkiä. Suurin ongelma kiinteiden mitta-asetemien käytössä on niiden korkea hinta. Tämä johtuu

siitä, että kaikkien eroosioon liittyvien tekijöiden vaikutusta ei voida tutkia yhdellä kertaa ja on suoritettava useita erillisiä aikaavieviä kokeita. Ongelmia voidaan vähentää synnyttämällä sade ja pintavalunta keinotekoisesti sadetuslaitteistolla. Sillä voidaan helposti säädellä sateen energiaa, määrää, intensiteettiä ja pintavaluntaa ja suhteellisen lyhyessä ajassa pystytään suorittamaan useita kokeita. Keinotekoisesta sateesta synnyttämä pintavalunta poikkeaa vastaavasta luonnollisesta valunnasta eikä sitä käytettäessä voida ottaa huomioon lumensulamisvesien vaikutusta. Peräkkäisissä kokeissa maan kosteuspitoisuus ei ehdi palautua todelliselle tasolle ja aiheuttaa siten virhettä. Simuloidulla sateella saadaan selville maan erodoituvuus tietyissä oloissa, mutta ei todellista eroosiomäärää.

Kokonaisen valuma-alueen eroosiomäärä saadaan parhaiten selville mittaamalla sen uomissa virtaavan veden kiintoainespitoisuus ja virtaama. Menetelmää ovat Suomessa soveltaneet mm. Mussaari (1974), Pekkarinen (1979) ja Mansikkaniemi (1982). Määrittäminen voidaan tehdä erottamalla kiintoainespitoisuus vesinäytteestä, suoraan fotoelektrisesti tai radioaktiivisten isotooppien avulla. Esimerkiksi McHenry ja Bubezer (1985) tutkivat eroosiota ja sedimentoitumista  $^{137}\text{Cs}$ -isotoopin avulla. Virtaavan veden hienoainespitoisuus vaihtelee hyvin paljon riippuen mittausajankohdan ja paikan mukaan. Suurin ongelma on löytää yhteys veden hienoainespitoisuuden ja eroosiomäärien väliltä. Tämän selvittämiseksi on tarpeen mitata pohjakulkeuman, hienoainespitoisuuden ja liuenneiden aineiden määrät uoman eri kohdissa eri suuruusilla virtaamalla.

#### 4. EROOSIOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Vesieroosion suuruuteen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa sitä synnyttäviin voimiin ja niiden määrää ja tehoa sääteleviin olosuhteisiin. Edellisiin kuuluvat sade ja sen tai sulamisvesien synnyttämä pintavalunta. Jälkimmäiseen sisältyvät maaperän ominaisuudet, peltojen sijainti, muoto ja koko, viljelytekniikat, kasvillisuus ja lämpötila. Olosuhteet ovat sidoksissa toisiinsa ja eroosiota synnyttävät tekijät muuttavat niitä. Eroosion vähentämisen kannalta edellistä mielekkäämpi on jako tekijöihin, joihin voidaan vaikuttaa ja joihin ei voida vaikuttaa (kuva 6).



Kuva 6. Eroosioon vaikuttavat tekijät ja niiden väliset keskinäiset yhteydet.

Oheinen kaavio ei pyri esittämään absoluuttista totuutta, siinä on esitetty merkittävimmät tekijät ja niiden väliset yhteydet Suomen oloissa. Esimerkiksi pellon kaltevuuteen voidaan vaikuttaa, mutta tässä on oletettu, ettei sitä tulla maassamme tekemään. Rinteen pituudella tarkoitetaan pintavaluman kulkemaa matkaa pellolla.

Seuraavassa on selkeyden vuoksi tarkasteltu erikseen kunkin tekijän suoraa vaikutusta eroosion suuruuteen. Samalla on valotettu tekijöiden keskinäisiä yhteyksiä ja välillistä vaikutusta.

## 4.1 Hydrologia

Hydrologisen kierron osista merkittävimpiä ovat veden varastoituminen nesteenä maaperään, kiinteässä muodossa jää- ja lumipeiteeseen ja routana maaperään sekä siirtyminen varastotilasta toiseen sadannan ja valunnan kautta. Koska sade ja pintavalunta synnyttävät eroosion, niiden ominaisuuksien perusteella voidaan hyvin pitkälle päätellä Suomen eroosio-ongelman vakavuus toisenlaisiin ilmastoalueisiin verrattuna.

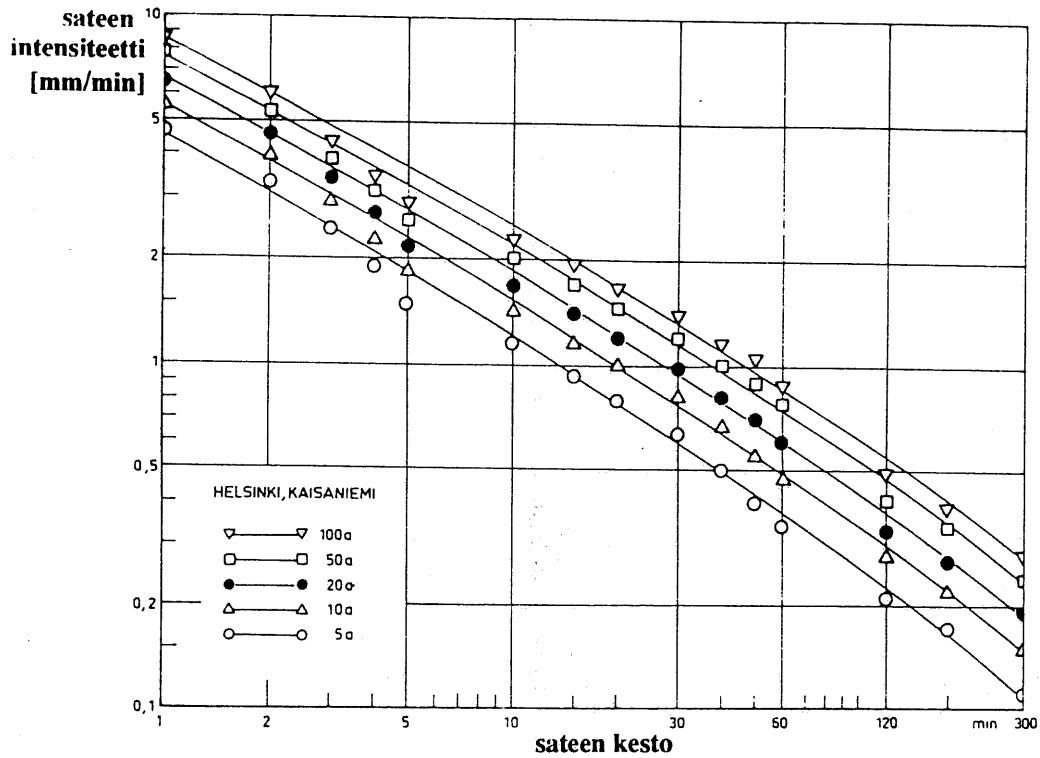
### 4.1.1 Sadanta

Suomen keskisadanta oli jaksolla 1961...1975 n. 660 mm/a. Etelä-Suomessa vuosisadanta ylitti paikoin 750 mm, maan keskiosissa paikoin jopa 800 mm, ja Lapissa sen arvo vaihteli 550...700 mm. Maaliskuun, joka on vuoden vähäsateisin kuukausi, osuus vuosisadannasta on keskimäärin 5 %. Vastaavasti runsassateisimman kuukauden, elokuun, osuus on 13 %. Maapallon maa-alueiden keskisadanta on 735 mm/a, eli se on samaa luokkaa Suomen sademäärän kanssa. Suomen ilmaston erityispiirre on sateiden tasainen jakautuminen ajallisesti (Kuusisto 1980,1986).

Sadepisaroiden eroosivoima riippuu niiden kineettisestä energiasta, yhden pisaran energia on verrannollinen sen halkaisijan kolmanteen ja putoamisnopeuden toiseen potenssiin. Tästä syystä saattaa suuren nopeasti putoavan pisaran voima olla 10 000 -ertainen verrattuna pienen ja hitaasti putoavan pisaran voimaan (Schwab et al. 1981). Sateen eroosivoima ilmaistaan parhaiten sen energian ja tietyn ajan maksimi-intensiteetin avulla. USAssa aikana käytetään 30 minuuttia. (Wischmeier et al. 1958, ref. Schwab et al. 1981). Wischmeierin mukaan energian ja intensiteetin tulo vaihtelee 100 - 10000 J/m<sup>2</sup> sadantaolosuhteista riippuen.

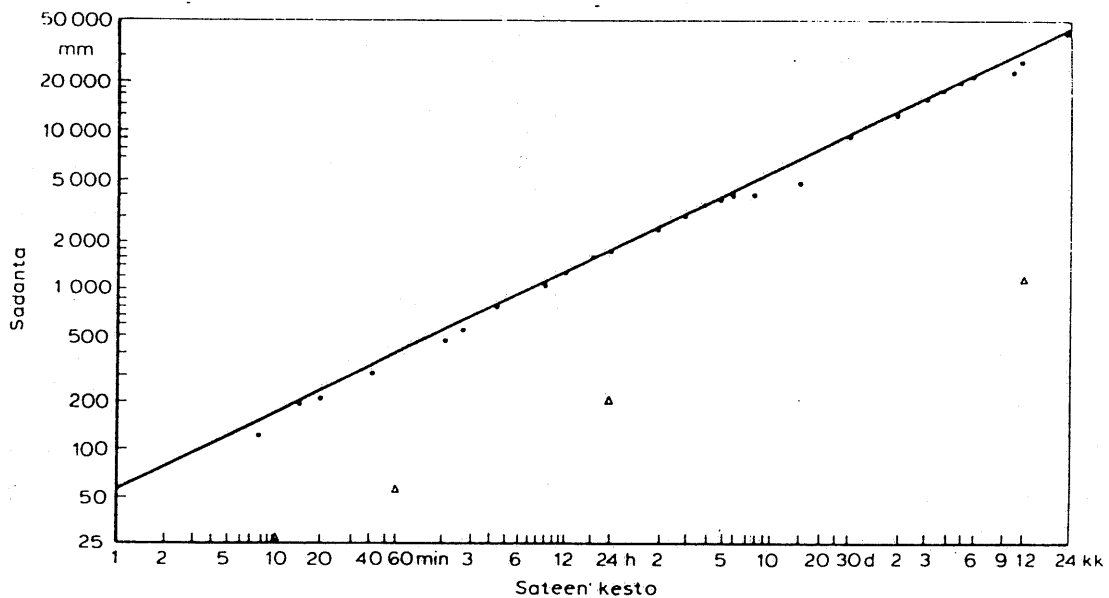
Suurimmillaan pisaroiden aiheuttama hiukkasten sinkoilu on sateen alussa maan kostuttua, etäisyys vaihtelee 0.5...1.5 m. Sateen jatkuessa valumavesikerros kasvaa ja vähentää pisaroiden iskuvoimaa. Samalla lisääntyy virtauksen maan kulutus. Sadepisara-eroosion vaikutus on suurin rinteen yläosassa, kun taas alaosassa valunnan vaikutus dominoi. Sama kahtiajako voidaan havaita pienemmässä mittakaavassa pelloilla vakojen välissä (Zachar 1982).

Sateen intensiteetti ja määrä vaikuttavat kokonaisvoimaan summatekijöinä lisäten pisaraniskuja. Intensiteetin kasvaessa sateen kesto ja vaikutusalue yleensä pienenevät (kuva 7), mutta yksittäisten pisaroiden koko ja energia kasvavat (Linsley et al. 1975; Zachar 1982).



Kuva 7. Lyhytaikaisten sateiden rankkuus Helsingissä eri toistumisajoilla (Kuusisto 1980).

Kaikkein rankimmatkin sateet Suomessa jäävät selvästi pienemmiksi maapallon tasoon nähden. Suurin maassamme v. 1980 mennessä mitattu vuorokausisademäärä oli 198.4 mm, joka on 10.5 % maailman ennätyksestä (Kuusisto 1980).



Kuva 8. Suurimmat maapallolla mitatut pistesadannan rankkuudet eri kestoajoilla (Linsley et al. 1972, ref. Kuusisto 1986). Kuvaan on myös merkitty kolmioilla suurin Suomessa havaittu vuorokausi ja vuosisadanta sekä Helsingissä kerran 100 vuodessa esiintyvät rankimmat 10 ja 60 min sadannat (Kuusisto 1986).

Intensiteetin  $I$  [mm/h] ja pisaroiden keskimääräisen halkisijan välille on saatu kokeellisesti yhteys (FAO 1978):

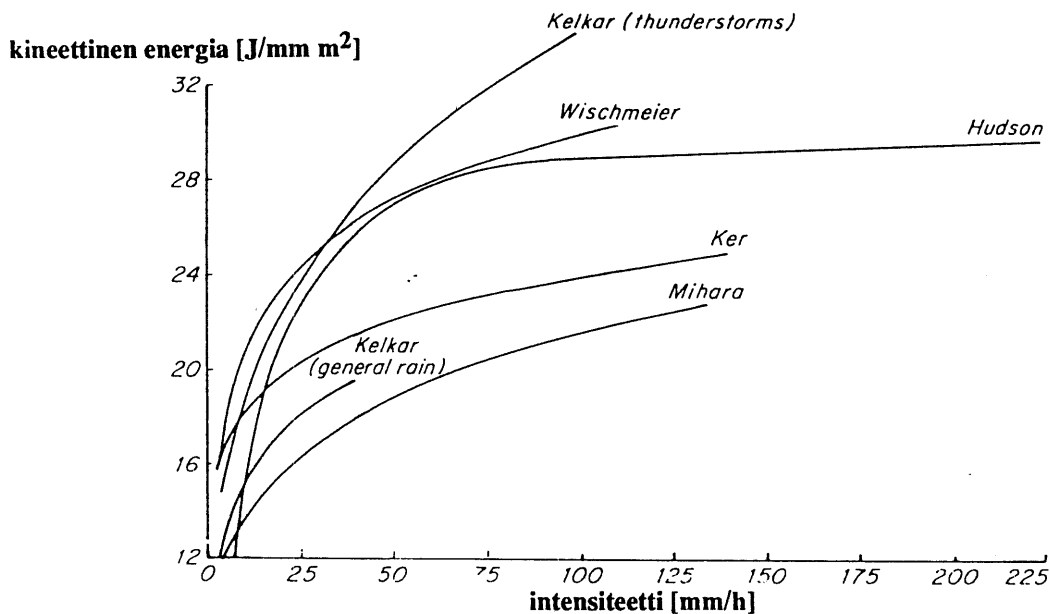


$$D_{50} = 1.238 I^{0.182} \text{ [mm]} \quad (1)$$

Kuvassa 9 on esitetty graafisesti eri maanosissa määritetyt sateen intensiteetin ja kineettisen energian väliset yhteydet. FAO (1978) esittää yhteyden kaavalla:

$$Y = 206 + 87 \log_{10} x \quad (2)$$

$Y$  = neliömetrille tulevan sateen kineettinen energia [J/cm]  
 $x$  = sateen intensiteetti [cm / h]



Kuva 9. Sateen intensiteetin ja kineettisen energian välinen yhteys eri tutkijoiden mukaan eri maissa. Kelkar -Intia, Hudson -Rhodesia, Ker -Trinidad, Mihara -Japani, Wischmeier -USA (Hudson 1971).

Helsingissä kerran 5 vuodessa toistuvan tunnin pituisen sateen intensiteetti on n. 24 mm/h (kuva 7). Sen kineettinen energia on kaavan 2 mukaan 239 J/cm m<sup>2</sup>. Esimerkiksi USAn keskiosissa vastaavan toistumisajan sateen intensiteetti on n. 50 mm/h (Schwab et al. 1981) ja kineettinen energia 267 J/cm m<sup>2</sup>. Ero sateiden kineettisten energioiden välillä ei ole merkittävä. Sateiden eroosivoimien ero selviää aiemmin mainitun energian ja intensiteetin tulon avulla. Kun oletetaan, että esitetyt sateiden intensiteetit ovat 30 min maksimi-intensiteettejä, saadaan sateen eroosivoimaksi Helsingissä 574 J/m<sup>2</sup> ja USAssa vastaavasti 1335 J/m<sup>2</sup>.

Hudsonin (1971) mukaan sateen intensiteetin eroosiota synnyttävä raja-arvo on 25 mm/h. Lauhkean ilmastovyöhykkeen sateista ainoastaan n. 5 % ylittää tämän arvon, kun taas trooppisella alueella sen ylittää 40 % sateista. Lisäksi kokonaissademäärät trooppisissa ovat suuremmat, mikä lisää eroosiota aiheuttavien sateiden määrää. Kun esimerkiksi lauhkealla ilmastoalueella vuotuinen sademäärä on 750 mm, eroosiota synnyttäviä sateita tästä on 37.5 mm. Jos vuoden sademäärä trooppisissa on 1500 mm, eroosiota aiheuttaa

600 mm sateesta. Ongelmaa pahentaa se, että eroosiota aiheuttavien sateiden keskimääräinen intensiteetti tropiikissa on lauhkeaa ilmastovyöhykettä suurempi.

#### 4.1.2 Valunta

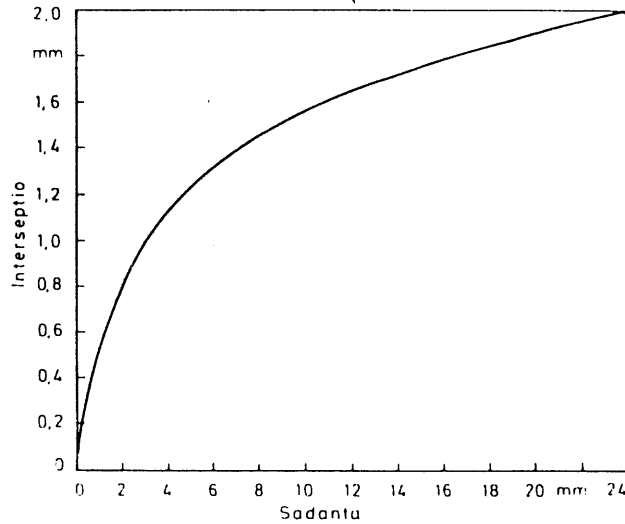
Valunnan muodostuminen alkaa siitä, kun vesi tulee maahan sateena tai lumena. Kokonaisvalunta voidaan jakaa maanpäälliseen, pintakerros- ja pohjavesivaluntaan. Maanpäällistä valuntaa kutsutaan myös pintavalunnaksi. Sillä tarkoitetaan sitä painovoiman vaikutuksesta kulkevaa jäännöstä, joka jää jäljelle sateesta ja sulamisvesistä, kun niistä vähennetään interseptio, painannevarastoituminen, infiltraatio ja evaporaatio maan pinnasta.

Etelä-Suomessa valunta maa-alueilta on 200...300 mm/a ja Pohjois-Suomessa 300...400 mm/a. Eri mantereiden valunnat poikkeavat huomattavasti toisistaan, esim. Etelä-Amerikassa keskivalunta on n. 685 mm/a ja Afrikassa 150 mm/a (Kuusisto 1986). Suomen ilmastovyöhykkeelle on tunnusomaista valunnan jakautuminen vuodenaikojen mukaan neljään selvästi erotettavaan kauteen (Hyvärinen 1986). Pintavalunnan kannalta merkittävimmät jaksot ovat kevät ja syksy: kevätvalunta aiheutuu lumen sulamisesta ja sulamiskauden sadannasta. Se on maan eteläosissa keskimäärin 100...120 mm ja Pohjois-Suomessa 140...180 mm, prosentuaalinen osuus vuosivalunnasta on siten maan eri osissa 40...60 %. Lumen vesiarvon keskimaksimista kevätvalunta on n. 80 %. Syysvalunnan määrä vaihtelee sadesuhteista riippuen. Etelä-Suomessa se on keskimäärin 50...100 mm, mutta saattaa märkänä syksynä ylittää 100 mm tai jäädä kuivana jopa alle 10 mm. Maan keski- ja pohjoisosissa syysvalunta jää muuta maata pienemmäksi, koska pysyvä lumipeite tulee aikaisemmin.

Kesävalunta on yleensä pieni, sen suuruus on Etelä-Suomessa keskimäärin 10...20 mm ja Pohjois-Suomessa 30...40 mm. Sadannasta riippuen sen arvot voivat vaihdella hyvin paljon. Talvivalunta on pääosin pohjavesivaluntaa ja keskimäärin melko vähäistä, yleensä alle 50 mm. Eteläisellä ja lounaisella rannikkoalueella suojasääät saattavat kuitenkin aiheuttaa huomattavasti suuremman valunnan.

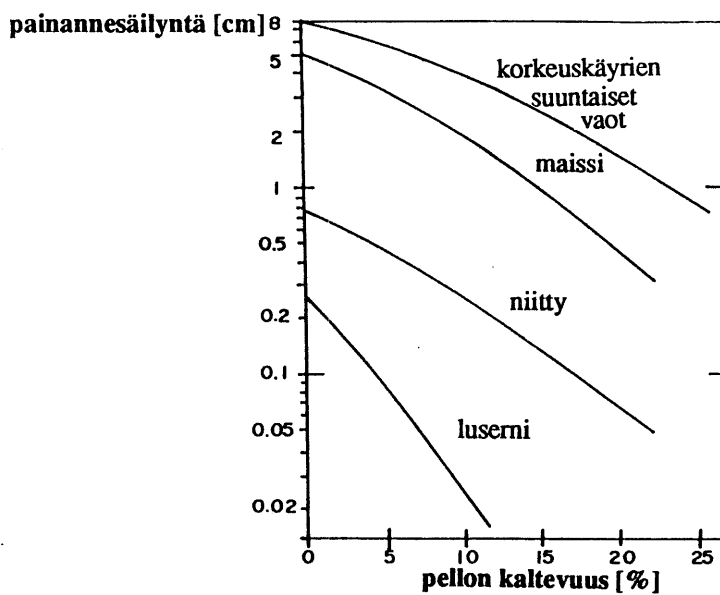
##### 4.1.2.1 Pintavaluntaan vaikuttavat tekijät

*Interseption* vaikutus pintavaluntaan on pieni, sen määrään vaikuttavat kasvityyppi ja tiheys, sateen määrä (kuva 10) ja intensiteetti, vuodenaika ja kasvien kasvuvaihe sekä maanpinnan muodot. Yleensä matemaattisessa käsittelyssä interseptiosäilyntä yhdistetään pintakerroksen muuhun varastoon.



Kuva 10. Interseptio riippuvuus vuorokausisadannasta 16...20 cm korkeassa nurmikossa (Rijteman 1965, ref. Vakkilainen 1986).

Maanpinnan painanteisiin varastoituu vettä, kun poistuva vesimäärä on tulevaa pienempi. Ilmiötä kutsutaan *painannesäilynnäksi*. Pellon pinnan epätasaisuudet syntyvät yleensä muokkauksesta. Varastotilaa voidaan lisätä myös istutuksilla, korjuujäännöksillä tai muokkaussuunnan järkevällä valinnalla. Varaston suuruuden tarkka määrittäminen on mahdotonta, useimmiten arviot suoritetaan kalibroimalla hydrologinen malli pellolta mitattujen tulosten avulla (kuva 11).



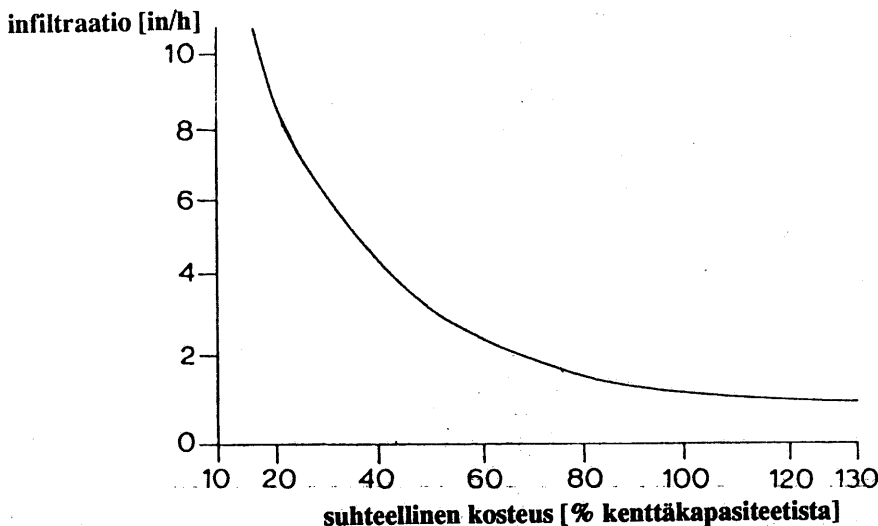
Kuva 11. Painannesäilyntä pellon eri kaltevuuksille ja erilaisille pinnoille (Hiemstra 1968, ref. Novotny & Chesters 1981).

Osa maassa olevasta vedestä *haihtuu*, määrä on vuosisadannasta Etelä-Suomessa n. 60 % ja Pohjois-Suomessa n. 50 %. Koska vuosihaihdunnasta yli puolet tapahtuu kolmen kesäkuukauden aikana, sillä on merkittävä vaikutus Suomen hydrologisiin oloihin. (Vakkilainen 1986). Globaalinen keskihaidunta maa-alueilta on Kuusiston (1986) mukaan 485 mm/a.

Fysikaalisesti haihdunta on samanlaista pinnasta riippumatta, mutta erot käytettävissä olevassa energiassa, ilmastotekijöissä, pintojen karkeuksissa ja veden saannissa aiheuttavat sen, että erilaisilta pinnoilta haihtuvat määrät vaihtelevat. Veden pinnasta tai sateen jälkeen paljaasta maasta tapahtuvaa haihduntaa säätelevät vain ilmasto- ja energiatekijät, koska vesimäärä ei rajoita sitä. Lumen ja jään pinnasta haihtumista rajoittaa se, että lämpötila ei nouse yli 0 °C ja kyllästetyn vesihöyryn paine-ero haihduttavan pinnan ja ilman välillä jää liian pieneksi. (Vakkilainen 1986).

Vesi, joka ei valu maanpinnalla, ei varastoidu eikä haihdu *infiltoituu* maahan. Infiltraatio ei ole synonyymi maan vedenjohtavuuden kanssa, vaan sillä tarkoitetaan veden suotautumista maan päältä maakerrokseen. Maan vedenjohtavuus on riippuvainen sen tekstuurista, tiiveydestä, orgaanisen aineksen määrästä ja kemiallisesta koostumuksesta. Infiltraatio on funktio maakerrosten vedenjohtavuuksista, maan kosteudesta, kasvipeitosta, lämpötilasta sekä mahdollisesti muista tekijöistä.

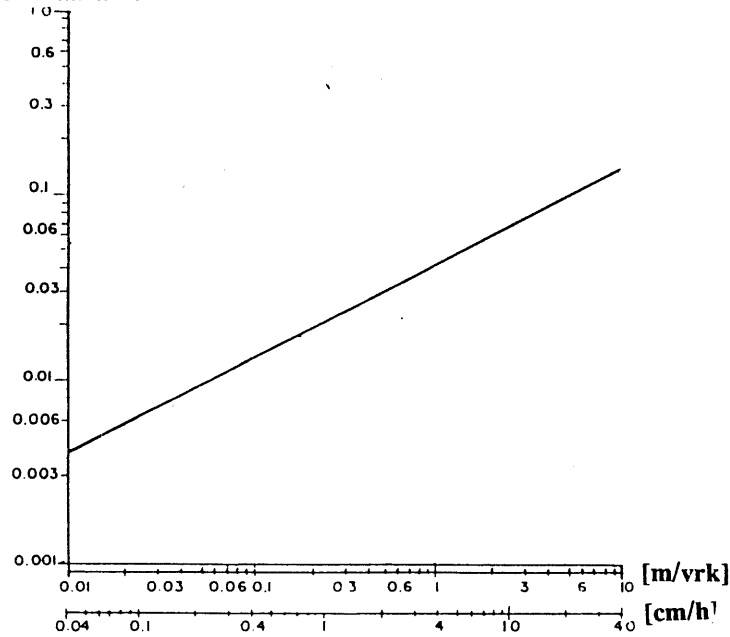
Veden suotautumiseen vaikuttavat gravitaatio- ja kapillaarivoimat yhdessä. Suotautumisen jatkuessa riittävän kauan kapillaarihuokokset täyttyvät vedellä ja kapillaari-imu pienenee. Veden perkoloituessa syvempiin maakerrokseen kohdistuu gravitaatioon yhä enemmän vastustavia voimia mm. huokostilan pienenemisen ja läpäisemättömän maakerroksen tai kallion lähestyessä. Sateen tai lumen sulamisen jatkuessa infiltraatio siis pienenee kunnes saavuttaa tietyn vakiotason (kuva 12).



Kuva 12. Infiltraation pieneminen maan kosteuden lisääntyessä (Ward 1967).

Yleistäen voidaan sanoa, että maan vedenläpäisevyys kasvaa maapartikkeleiden koon kasvaessa, koska huokostila samalla kasvaa (kuva 13).

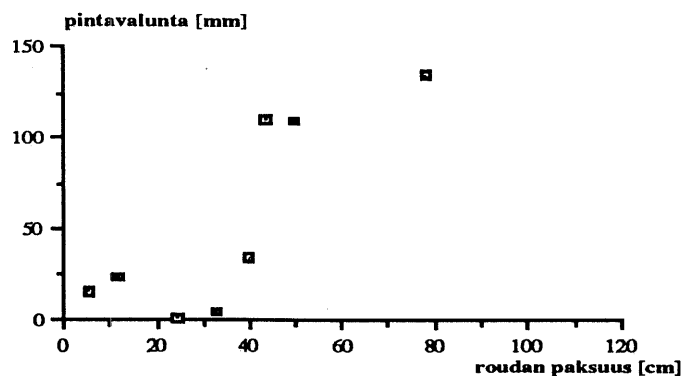
partikkeleiden keskimääräinen halkaisija [mm]



Kuva 13. Keskimääräisen raekoon vaikutus maan vedenläpäisevyyteen (Horn 1971, ref. Novotny ja Chesters 1981).

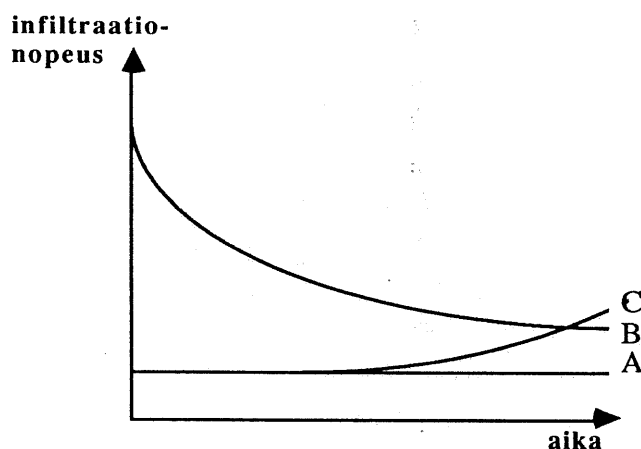
Vaikka veden suotautumisenopeus maahan on prosessin alussa riippuvainen maan kosteuspitoisuudesta, ei sillä kuitenkaan ole vaikutusta lopulliseen nopeuteen. Sen oletetaan olevan yhtäsuuri kyllästetyn maan vedenjohtavuuden kanssa, mutta todellisuudessa se on hieman pienempi maahan jäävän ilman takia (Skaggs & Khaleel 1982).

Suomen olosuhteissa tärkein infiltraatioon vaikuttava tekijä on routa, jonka vaikutus on pahimmillaan keväällä lumien sulamisen aikana, jolloin se vähentää tai estää kokonaan veden suotaumisen maaperään ja aiheuttaa runsaan maanpäällisen valunnan suojattomalle maalle. Seuna ja Kauppi (1981) havaitsivat pintavalunnan osuuden kokonaisvalunnasta kasvavan roudan paksuuden kasvaessa, mutta pelkkä roudan paksuus ei selittänyt kevätvalunnan suuruutta (kuva 14). Siihen vaikuttavat mm. roudan vedenläpäisevyys ja lumen vesiarvo.



Kuva 14. Roudan paksuuden ja kevätvalunnan välinen yhteys Seunan ja Kaupin 8 v. (1981) tulosten perusteella Etelä-Suomessa savipellolla.

Roudan vedenläpäisevyys riippuu jäätömiin huokosten määrästä ja koosta. Niihin vaikuttaa jäätymishetken kosteuspitoisuus. Yleistäen voidaan sanoa, että jos maa jäätyy kenttäkapasiteettia kosteammassa tilassa, niin infiltraatio jää pieneksi (kuva 15, käyrä A), ja mikäli maa on jäätymishetkellä täysin vedellä kyllästyneessä tilassa, ei imeytymistä tapahdu lainkaan. Jos maan vesipitoisuus jäätymishetkellä on pieni, ei infiltraatio poikkea paljoa jäätömiin maan infiltraatiosta (kuva 15, käyrä B). Kun maa jäätyy korkeahkossa vesipitoisuudessa (70...80 % kenttäkapasiteetista), sulamisvesi pääsee osittain tunkeutumaan maahan ja maa lämpiää. Lämpö sulattaa huokosissa olevan jään ja infiltraationopeus kasvaa (kuva 15, käyrä C).

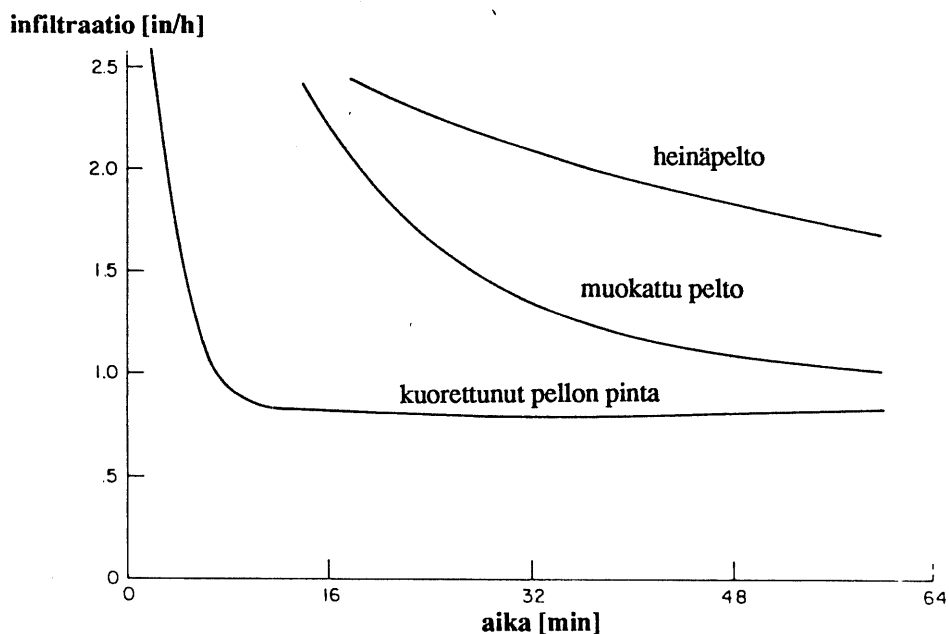


Kuva 15. Periaatteellinen kuva infiltraatiosta eri kosteuspitoisuuksissa jäätyneeseen maahan (Gray 1973, ref. Vakkilainen 1986).

Karvonen et al. (1986) havaitsivat tutkimuksissaan, että karkearakeisen jäätyneen maan vedenjohtavuus pysyy suhteellisen korkeana ja infiltraatiokapasiteetti ylittää lumen sulamisnopeuden. Jonkin verran veden suotautumista maahan alhaisissa läpötilassa hidastaa sen kasvanut viskositeetti (Airaksinen 1978; FAO 1978). Roudan sulaminen alkaa yleensä vasta kun lumipeite on hävinnyt, vaikka vuorokauden keskilämpötila kohoaisi 0 °C yläpuolelle. Poikkeuksena on kuitenkin Etelä-Suomi, jossa maa alkaa usein sulaa lumipeitteen alla. Jos routakerros on ohut, voi sulaminen tapahtua kokonaan alhaalta päin. Useimmiten se tapahtuu samanaikaisesti kerroksen ylä- ja alaosaan (Soveri 1986).

Roudalla on myös positiivisia vaikutuksia eroosioon lähinnä hienorakeisilla maalajeilla; se synnyttää maahan muruja, jotka eivät erodoidu aivan yhtä helposti pieniin maahiukkasiin verrattuna. Se myös kuohkeuttaa tiivistyneitä maita synnyttäen niihin makrohuokosia, joi- ta pitkin vesi voi suotautua alempiin kerroksiin. Kuohkeuttava vaikutus on riippuvainen maan kosteuspitoisuudesta sen jäätymishetkellä. Kivisaari (1979) totesi tutkimuksensa perusteella, että Suomen ilmastossa maan pintakerroksen tiivistymisestä ei ole merkittävää haittaa jäätymisen kuohkeuttavan vaikutuksen vuoksi.

Sadepisaroiden vaikutuksesta maan pinnalle hienoaineksesta syntyvä läpäisemätön kerros vaikuttaa infiltraatioon samalla tavalla kuin routa (kuva 16). Esimerkiksi Edwards ja Larsson (1969) havaitsivat kahden tunnin sadettamisen jälkeen maan pintakerroksen hydraulisen johtavuuden pienentyneen n. 90 % ja infiltraationopeuden n. 60 %.

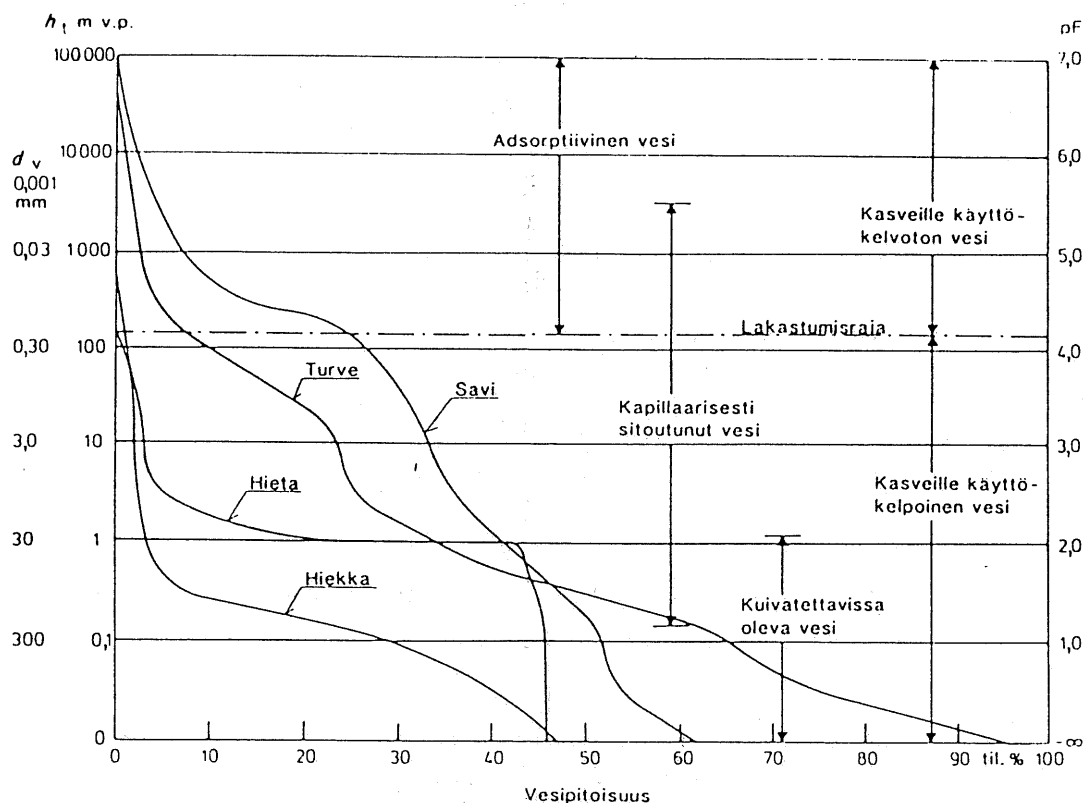


Kuva 16. Sadepisaroiden synnyttämän läpäisemättömän kerroksen vaikutus infiltraatioon erilaisilla pellon pinnoilla ( Skaggs & Khaleel 1982).

Maaprofiilin erilaiset kerrokset vaikuttavat veden suotautumiseen, koska vesi liikkuu maassa painegradientin alaisena. Siten hienorakeisen maan läpi suotautuva vesi ei kulkeudu sen alla olevaan karkeaan hiekkakerrokseen ennen kuin hienorakeinen kerros on niin kostea, että sen kosteusimu on pienempi hiekkään verrattuna. Hanks ja Bowers (1962, ref. Skaggs & Khaleel 1982) tutkivat Richardsin yhtälön avulla veden suotautumista kaksikerroksiseen maaprofiiliin. Kun profiilin päällimmäinen kerros oli karkearakeista ainesta, infiltraationopeus siihen oli alussa yhtä suuri kuin samanpaksuisessa maaprofiilissa, joka koostui vain karkeasta materiaalista. Kosteusrintaman saavuttaessa hienompirakeisen kerroksen sen etenemisnopeus hidastui ja infiltraationopeus pieneni. Jonkin ajan kuluttua koko profiilin infiltraationopeus asettui samalle tasolle, joka pelkällä hienoaineskerroksella oli. Päinvastaisessa tapauksessa hienoaineskerroksen ollessa karkean maan päällä oli infiltraatio aluksi samaa luokkaa kuin jos koko profiili olisi ollut hienoainesta, mutta siinäkin tapahtui pientä vähenemistä kosteuden levitessä karkeaan kerrokseen. Vastaavia tuloksia saivat myös Whisler ja Klute (1966, ref. Skaggs & Khaleel 1982).

Maahan suotautunut ja *varastoitunut vesi* voidaan jakaa kasveille käyttökelpoiseen ja käyttökelvottomaan veteen. Osa kasveille käyttökelpoisesta vedestä voidaan poistaa maasta kuivatuksella. Maan vedenpidätyskykyä kuvaa parhaiten vedenpidätyskäyrä (kuva

17), joka määritetään mittaamalla maahan sitoutuneen veden määrä erisuuruisilla imuilla. Kuivatettavissa oleva vesi poistuu maasta gravitaation vaikutuksesta, ja koska kasvit pystyvät kehittämään imun, jonka suuruus on n. 150 m, ovat tätä pienemmällä imulla sitoutuneet vedet kasvien käytettävissä. Kapillaarisesti sitoutuneen veden vyöhyke ulottuu 15...20 m imusta 2000...3000 m imuun, joten osan siitä pystyvät kasvit hyödyntämään. Tätä lujemmin kiinnittynyt vesi on sitoutunut hiukkasten pinnoille adsorptiivisesti (Vakkilainen 1986).



Kuva 17. Eri maalajien vedenpidätyskäyriä (Andersson 1971, ref. Vakkilainen 1986).

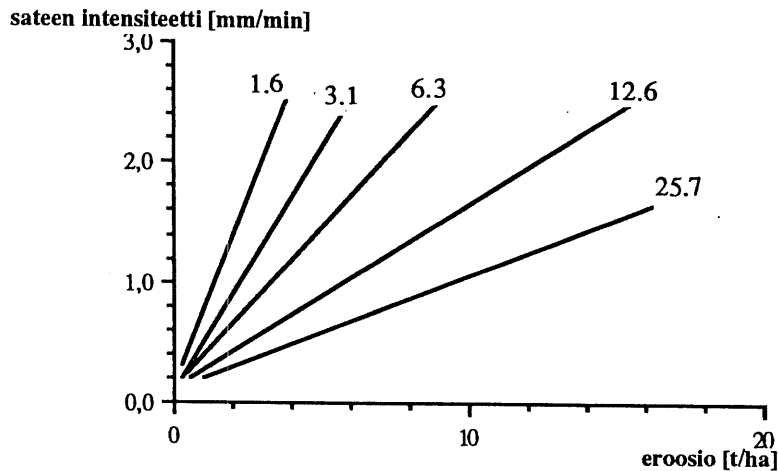
Maan raakoostumus vaikuttaa siis siihen, kuinka suuri varastotila sillä on. Karkeissa maalajeissa huokokset ovat suuria ja vesi poistuu niistä helposti, joten varastotilaa on yleensä jäljellä, mutta esim. savipitoisessa maassa vesi sitoutuu lujasti pieniin huokosiin, eikä tilaa maan päältä suotautuvalle vedelle löydy. Savipitoisuuden ohella myös humuspitoisuus lisää maan vedenpidätyskykyä.

## 4.2 Morfologia

Kriittiseksi kaltevuudeksi kutsutaan kaltevuutta, joka aiheuttaa haitallisen suuren eroosion suojaattomalla maalla. Sen arvo vaihtelee tapauskohtaisesti, Keski-Euroopassa se lienee 5...10 % (Zachar 1982). Jyrkimmillä pelloilla jo pelkästään sadepisaraeroosio aiheuttaa maa-aineksen nettosiirtymistä rinnettä alaspäin, mutta suurin vaikutus on valumaveden



virtausnopeuden kasvamisella. Tutkittaessa sateen intensiteetin, maanpinnan kaltevuuden ja eroosion välistä yhtettä havaitaan, että kun sateen intensiteetti on pieni, ei rinteiden kaltevuudella ole suurta vaikutusta eroosiomääriin. Vastaavasti loivalla rinteellä sateen intensiteetin merkitys on pieni (kuva 18).



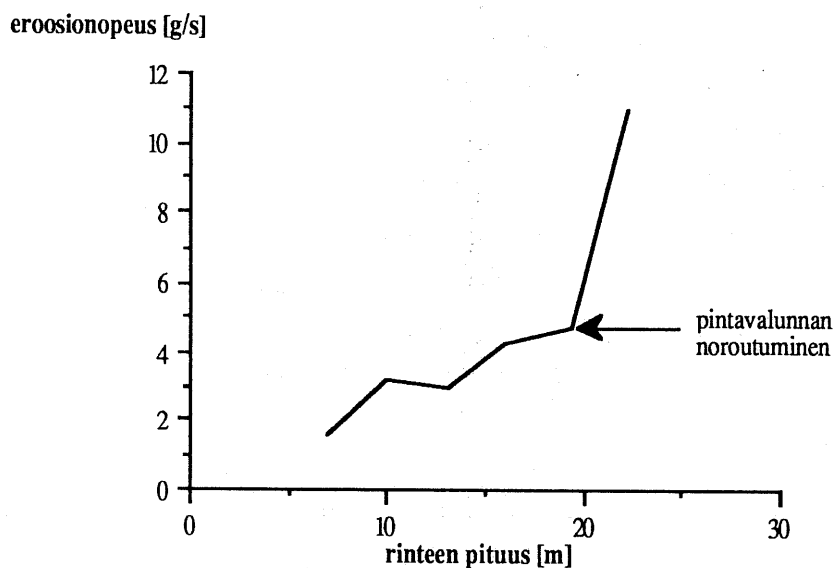
Kuva 18. Sateen intensiteetin ja maanpinnan kaltevuuden vaikutus eroosioon laboratorionkokeiden perusteella. Kaltevuudet annettu prosentteina (Neal 1938, ref. Zachar 1982).

Valuma-alueen korkeussuhteita voidaan kuvata vaihtelevuusindeksillä ( $R_v$ ). Sillä tarkoitetaan alueen suurimman korkeuseron ja pinta-alan suhdetta. Mansikkaniemen (1982) mukaan näin määritelty indeksi antaa liian suuria arvoja, koska siihen vaikuttavat ratkaisevasti alueen pienalaiset rotkot tai korkeat huiput. Sen tilalla tulisi käyttää ns. painotettua vaihtelevuusindeksiä  $R_{v10-90}$ , joka kertoo alueen vaihtelevuuden, kun jätetään huomiotta 10 % alueen korkeimmista ja matalimmista paikoista. Jotta korkeuserot kuvaisivat mahdollisimman hyvin peltoalueen eroosioherkkyyttä, ne pitäisi laskea erikseen kullekin rinteelle.

Mansikkaniemi (1982) analysoi tutkimuksessaan peltoalueiden topografiaa jakamalla alueen summittaisesti ruutuihin, joiden koko oli 1 ha. Analyysiin otettiin mukaan ne ruudut, joissa peltoala oli yli 50 %. Havainnot osoittivat ruutujen keskikaltevuuden yhdessä pelto-prosentin kanssa selittävän 89 %:sti kiintoaineksen keskimääräistä vuosikuljetusta. Pekkarinen (1979) sai diplomityössään samansuuntaisia tuloksia.

Free ja Bay (1969) tutkivat pellon pituuden ja kaltevuuden vaikutusta eroosioon hiesupelloilla (*silt loam*). Alueen vuotuinen sademäärä oli n. 850 mm ja talvella maa oli muokkauskerroksen syvyydeltä roudassa. Kolmen koepellon, joiden kaltevuudet olivat 4.7, 9.3 ja 16.8 % eroosiomäärien suhde oli 1:3:29. Kaltevuuden kasvu 3.6 kertaiseksi kasvatti eroosion 29 kertaiseksi. Rinteiden pituuden alkupisteinä pidetään sitä kohtaa, josta pintavalunta alkaa ja loppupisteinä kohtaa, jossa rinteiden kaltevuus on niin pieni, että sedimentoitumista syntyy, tai kohtaa, jossa valumavedet yhtyvät selvästi havaittavaksi kana-

vaksi. Kun rinteiden pituudet olivat 11, 22 ja 64 m, vastaava eroosiomäärien suhde oli 1:1:3. Gilley et al. (1987) mittasi eroosionopeuden muuttumista rinteiden pituuden suhteen hiesusavipellolla (*silty clay loam*), jonka kaltevuus oli 6.4 %. Pintavalunta synnytettiin sadettamalla 48 mm/h. Ennen sadetusta pelto kynnettiin ja äestettiin. Valumaveden eroosivoima kasvoi rinteiden pituuden kasvaessa, koska sen määrä ja nopeus lisääntyivät. Kuvassa 19 nähdään 20 m kohdalla piste, jossa eroosionopeus kasvaa jyrkästi. Syynä tähän on ilmeisesti pintavalunnan voimakas noroutuminen.



Kuva 19. Eroosionopeus rinteiden pituuden mukaan (Gilley et al. 1987).

Kriittisellä pellon pituudella ja kaltevuudella tarkoitetaan niitä pituuden ja kaltevuuden arvoja, joilla eroosio alkaa. Kaltevuus vaikuttaa kriittisen pituuden arvoon ja vastaavasti pituus kriittisen kaltevuuteen. Esimerkiksi loivan rinteiden kriittinen pituus ja lyhyiden rinteiden kriittinen kaltevuus ovat suuria. Vastaavat jyrkän tai pitkän rinteiden arvot lähestyvät nollaa.

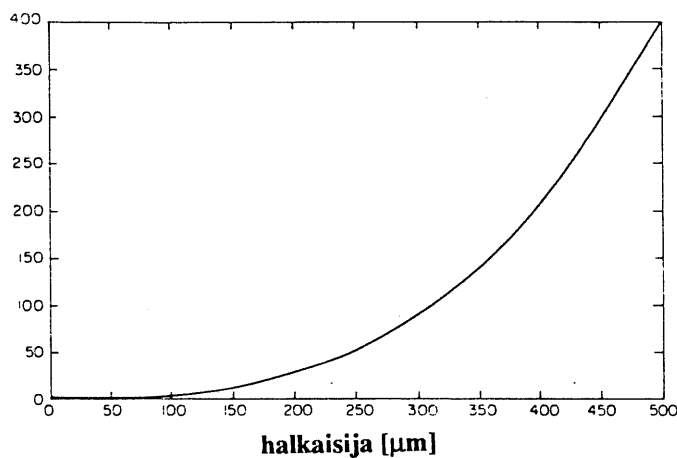
USAssa tehdyt tutkimukset osoittavat rinnepellon tapahtuvan eroosion määrän olevan verrannollinen sen pituuden neliöjuureen. Jos maalaji halkeilee kuivuessaan, valuma pienenee rinteiden pituuden kasvaessa ja pituuden eksponentti lähenee nollaa. Vastaavasti valuman kasvaessa rinteiden pituuden mukana eksponentti on suurempi kuin 0.5. Sen arvoon vaikuttavat myös kasvipeite, sateen intensiteetti ja rinteiden jyrkkyys (FAO 1978).

Rinteet voidaan muotonsa perusteella jakaa karkeasti kuperiin ja koveriin rinteisiin. Edellisten jyrkkyys kasvaa loppua kohden ja samalla kasvaa myös valuman nopeus. Jos jyrkimmän osan maakerrosta ei ole millään lailla suojattu, se erodoituu nopeasti. Jälkimmäisessä tapauksessa rinteiden jyrkkyys ja sen mukana valumaveden nopeus pienenee loppua kohden, ja veden mukana mahdollisesti tullut hienoaines sedimentoituu (Foster 1982).

### 4.3 Maaperä

Maaperän ominaisuudet säätelevät eroosiota synnyttävän pintavalunnan määrää ja laatua sekä maan eroosioherkkyyttä. Tässä yhteydessä käsitellään lähinnä maan erodoituvuutta. Maapartikkelin koolla on maalajin eroosionvastustuskykyyn välitön ja välillinen vaikutus: jos oletetaan maapartikkelin olevan tiheydeltään vakio ja pallon muotoinen, sen massa kasvaa suhteessa halkaisijan neliöön, ja samassa suhteessa vaikeutuu sen irtoaminen virtaavan veden vaikutuksesta (kuva 20).

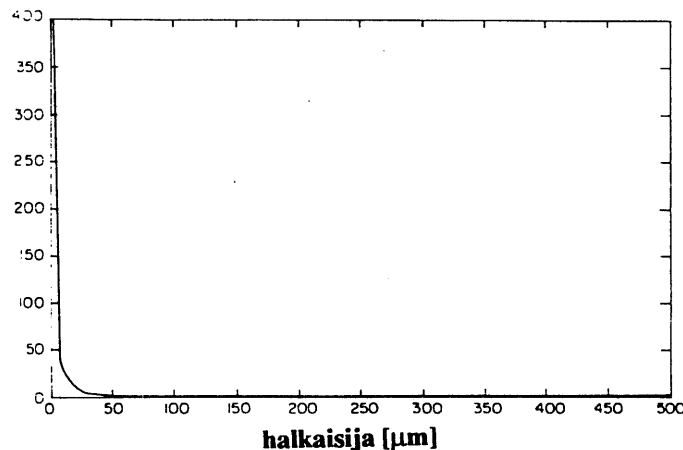
suhteellinen vastustuskyky



Kuva 20. Maapartikkelin painon ja halkaisijan vaikutus sen kykyyn vastustaa eroosiota (Gregory 1982, ref. Beasley et al. 1984).

Toisaalta mitä pienempiä maahiukaset ovat, sitä suurempi ominaispinta-ala niillä on ja sitä helpommin ne sitoutuvat toisiinsa, jolloin niiden kyky vastustaa eroosiota liisääntyy (kuva 21).

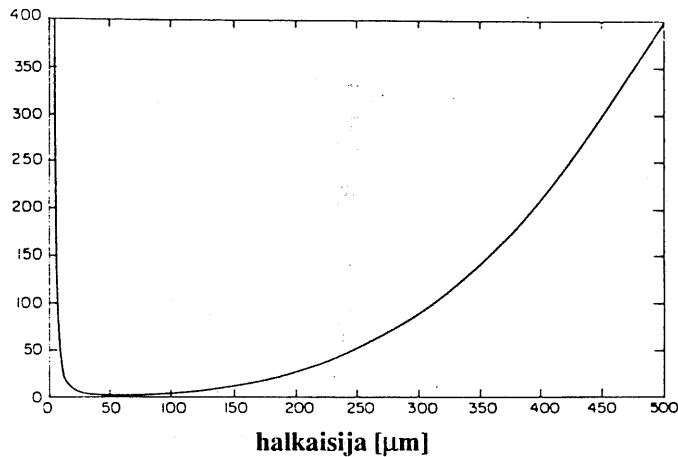
suhteellinen vastustuskyky



Kuva 21. Partikkeleiden koon ja sitoutumisen yhteisvaikutus eroosioresistanssiin (Gregory 1982, ref. Beasley et al. 1984).

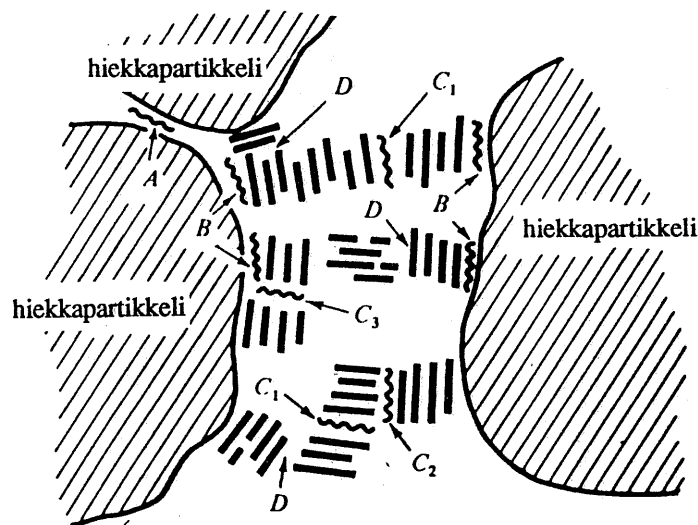
Maan eroosion kokonaisvastustuskyky on yksittäisten vastustuskykyjen summa; maalajit, joiden partikkelikoko on kyllin pieni, jotta ne muodostavat tehokkaasti muruja tai maalajit, joiden partikkelikoko ja -paino on hyvin suuri, kykenevät parhaiten vastustamaan eroosiota (kuva 22) (Beasley et al. 1984).

#### suhteellinen vastustuskyky



Kuva 22. Partikkelikoon kokonaisvaikutus eroosioresistanssiin (Gregory 1982, ref. Beasley et al. 1984).

Sen lisäksi että murut vähentävät hienorakeisen maan eroosiota ne muodostavat parhaan kasvu ympäristön juurille. Suotuisin murukoko kasvien kasvun kannalta vaihtelee 0.5...5 mm (Marshall & Holmes 1981). Murujen muodostumismekanismia ei tunneta täydellisesti. Emersonin (1959, ref. White 1979; Marshall & Holmes 1981) esittämän teorian mukaan kerrosrakenteiset savipartikkelit kiinnittyvät toisiinsa ja muihin partikkeleihin elektrostaattisin voimin tai orgaanisen aineksen välityksellä (kuva 23).



Kuva 23. Aggregaatin rakenne-esimerkki. Sidostyyppit: A , hiekkapartikkeli-orgaaninen aines-hiekkapartikkeli; B , hiekkapartikkeli-orgaaninen aines-savipartikkeli; C , savipartikkeli-orgaaninen aines-savipartikkeli; D , savipartikkeleiden välinen elektrostaattinen sidos (Emerson 1959, ref. White 1979; Marshall & Holmes 1981).

Maan pieneliöstö sekoittaa maata ja muodostaa orgaanisesta aineesta murujen rakennusmateriaalia. Charles Darwin arvioi v. 1881, että kastemadot kasvattavat suotuisissa olosuhteissa maan pintaa 5 mm/a (Marshall & Holmes 1981). Whiten (1979) mukaan orgaaninen aines on tärkein aggregaatteja sitova aine, jos maan pH on välillä 5.5...7. Hajoavien kasvinosien lisäksi sitovaa ainetta syntyy kasvavien kasvien juurista erittyvästä geelistä. Juuret lisäävät aggregaattien määrää myös kuivattamalla, puristamalla ja sekoittamalla maata. Kuivumisen synnyttämät aggregaatit ovat lujia ja tiiviitä. Lisäksi aggregaattien väleihin jäävät raot ovat kestäviä ja johtavat hyvin vettä. Maan jäätyminen aiheuttaa hienorakeisissa maalajeissa kuivumista. Samalla mahdollisesti syntyvät jäälinssit puristavat maapartikkeleita muruiksi (Marshall & Holmes 1981).

Orgaanisen aineksen sitomat murut ovat alttiita mikrobien hajotukselle. Esimerkiksi aridisilla alueilla maaperän orgaanisen aineksen pitoisuus on pieni johtuen korkean lämpötilan aiheuttamasta nopeasta hajoamisesta. Sama ilmiö voidaan havaita miltei kaikilla ilmastoalueilla vertailemalla kukkuloiden etelä- ja pohjoispuolia. Merkittävin muruja hajottava tekijä sadepisaroiden iskujen lisäksi on niiden nopea kostuminen; kosteuden edetessä murun sisäosiin sinne jää ilmaa, jonka kasvava paine särkee murun. Paineen vaikutusta tehostaa rakeiden välisten sidosten löyhtyminen kostumisen vaikutuksesta. Myös murujen toistuva jäätyminen ja sulaminen löyhdyttää maata ja helpottaa siten partikkeleiden irtoamista valumaveden voimasta (FAO 1978).

## 4.4 Pellon pinta

### 4.4.1 Muokkaus

Muokkauksen tavoitteena on valmistaa maahan hyvärakenteinen kylvö- ja kasvualusta, jossa maan ilmavuus-, vesitalous- ja lämpöolot olisivat mahdollisimman suotuisat niin itämiselle kuin kasvien myöhemmälle kehitykselle. Toisaalta muokkauksella pyritään estämään rikkaruohojen leviäminen. Muokkaustavat ja -menetelmät vaihtelevat viljeltävän kasvin, pellon ominaisuuksien ja säätekijöiden mukaan. Suomessa jokavuotista syyskyntöä pidetään kaiken maanmuokkauksen perustana. Eroosion vaivaamissa maissa on kehitetty ns. suojamuokkausmenetelmiä (*conservation tillage*), joissa pellon pinnalle tai pintakerrokseen jätetään edellisen sadon korjuujäännöksiä yleensä silputtuna (Baker & Laflen 1983; Dickey et al. 1983, 1985). Soil Conservation Society of America (1982 ref. Andraski et al. 1985) määrittelee suojamuokkauksen menetelmäksi, jossa maata ei käännetä ja Dickey et al. (1984) esittävät, että suojamuokkausmenetelmiä ovat kaikki sellaiset muokkaustavat, joiden jättämä korjuujäännöspeitto on yli 20 %. Viimeisen määritelmän perusteella myös kyntöä voitaisiin joissain tapauksissa pitää suojamuokkausmenetelmänä, mutta tähän tutkimukseen käytetyssä aineistossa ei sellaisia tapauksia

esiintynyt. Suorakylvöllä tarkoitetaan viljelymenetelmiä, joissa maata ei muokata, pintakerrosta rikotaan vain sen verran, että siemen saadaan kylvettyä maahan (*no-till*).

Koska muokkauksella vaikutetaan pintamaan rakenteeseen ja muotoon, sillä on suora vaikutus maan erodoituvuuteen ja valunnan ominaisuuksiin. Lisäksi muutokset maan varastotilavuudessa ja vedenläpäisevyydessä heijastuvat muutoksina infiltraatioon ja sitä kautta pintavaluntaan.

#### 4.4.1.1 Menetelmät

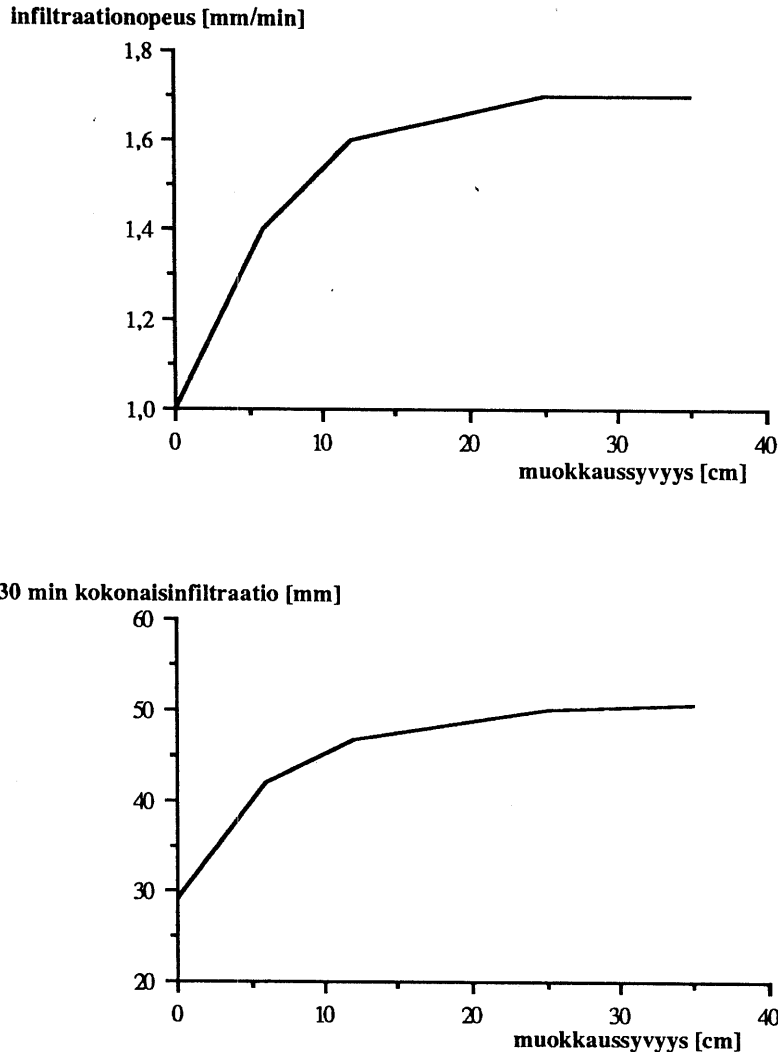
Andraski et al. (1985) havaitsivat suojamuokatulla pellolla pintavaluntojen olevan poikkeuksetta pienempiä kynnettyyn peltoon verrattuna. Suurimpien valuntojen aikana ero vaihteli 68 %...100 %. Osan suuresta erosta selittää Mukhtarin et al. (1985) tutkimus, jossa verrattiin kyntämällä, suojamuokkauksella ja ilman muokkauksia viljeltävien maiden tilavuuspainoja, kosteuspitoisuuksia ja infiltraatio-ominaisuuksia toisiinsa (taulukko 2).

Taulukko 2. Muokkausmenetelmän vaikutus maan kosteuteen, tilavuuspainoon ja kumulatiiviseen infiltraatioon (Mukhtar et al. 1985).

menetelmä	kosteuspitoisuus [paino - %]	tilavuuspaino [Mg/m <sup>3</sup> ]	1 min kum. inf. [cm]	30 min kum. inf. [cm]
aurakyntö	22.7	1.12	1.24	11.7
suojamuokk.*	24.0	1.12	1.67	18.4
ei muokkausta	25.0	1.15	0.80	8.5

\* kahden eri suojamuokkausmenetelmän (*chisel plow* ja *paraplow*) keskiarvo

Tuloksista nähdään, että auralla kynnetyn maan kosteuspitoisuus on pienin. Ero johtuu suojamuokkausmenetelmien maan pinnalle jättämästä kasvinjäännöspeitosta, joka estää haihtumista. Eri menetelmät löyhdyttävät maata käytännöllisesti katsoen yhtä hyvin, ainoastaan muokkaamatta jätetty maa on hieman muita tiiviimpää, mutta luonnon oman muokkauksen avulla sekin pysyy melko huokoisena. Vaikka suojamuokatun maan kosteuspitoisuus on korkea, sen 1 ja 30 min kumulatiiviset infiltraatiot ovat muita suurempia. Tämä johtuu siitä, että suojamuokkauksen synnyttämät makrohuokokset säilyttävät ominaisuutensa hyvin kasvinjäännöspeiton antaman suojan ansiosta. Andraski et al. (1985) havaitsivat kasvinjäännösten ehkäisevän sadepisaroiden vaikutuksesta syntyvän läpäisemättömän kerroksen muodostumista pellon pinnalle. Huokoisuuden ja varastotilan kasvattamisen vaikutus veden suotautumiseen näkyy selvästi Zacharin (1982) tutkimuksesta: muokkauksen syventäminen 6:sta 35 cm:iin kasvatti infiltraationopeutta ja kokonaisinfiltraatiota 21 % (kuva 24).

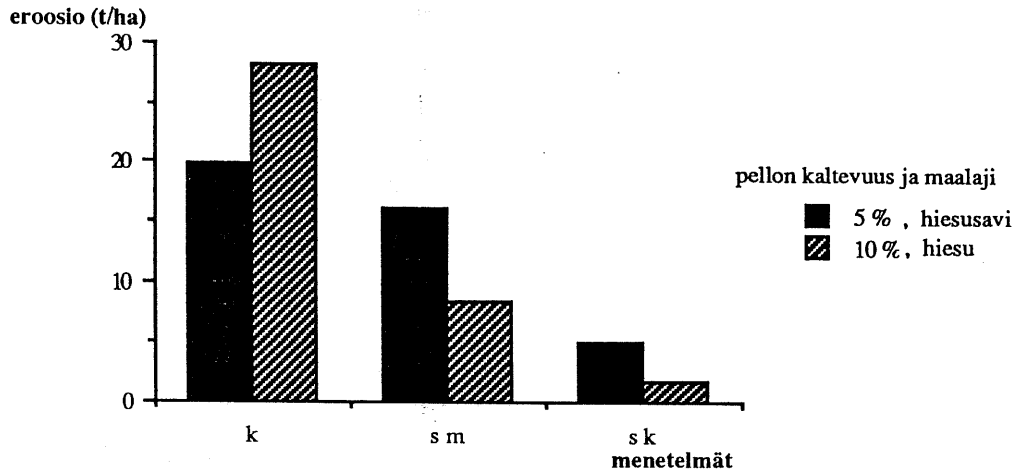


Kuva 24. Muokkaussyvyuden vaikutus infiltraationopeuteen ja 30 min kokonaisinfiltraatioon. Sateen intensiteetti oli 2 mm/min ja sademäärä 60 mm (Zachar 1982).

Maan muokkaus vaikuttaa roudan paksuuteen ja sitä kautta infiltraation määrään. Gustafssonin ja Torstenssonin (1984b) kahdeksan vuoden mittauksissa viitenä vuotena routa oli selvästi paksumpi kynnetyllä pellolla heinäpeltoon verrattuna. Kuitenkin roudan sulaminen kynnetyltä pellolta oli nopeampaa, joten lopputulos oli se, että maa vapautui roudasta miltei samaan aikaan molemmilla pelloilla.

Andraskin et al. (1985) tuloksia tukevat myös muut tutkimukset: Johnson et al. (1979) havaitsivat suojamuokkausmenetelmien pienentävän pintavaluntaa 35 ... 41 % normaaliin kyntöön verrattuna. Meyerin et al. (1970, ref. Allmaras et al. 1985) tulokset osoittivat, että 0.56 t/ha vehnänolkia vähensi valuntaa yli puolella paljaaseen maahan verrattuna. Dickey et al. (1983) ja Jennings et al. (1985) havaitsivat, että suojattomalla maalla valunta syntyy nopeammin ja sen määrä on suurempi verrattuna peltoon, jolla on korjuujäänöksiä.

Dickey et al. (1984) vertasivat eroosiomääriä kynnetyltä, suojamuokatulta ja ilman muokkausta viljellyltä pellolta sadettimen avulla kahdella eri pellon kaltevuudella. Sadetus ja mittaukset tehtiin heti muokkauksen tai pelkän sadonkorjuun jälkeen. Sateen intensiteetti oli 63.5 mm/h ja sen annettiin jatkua niin kauan, kunnes valunta saavutti vakioarvon. Mittaustulosten keskiarvot on esitetty graafisesti kuvassa 25.

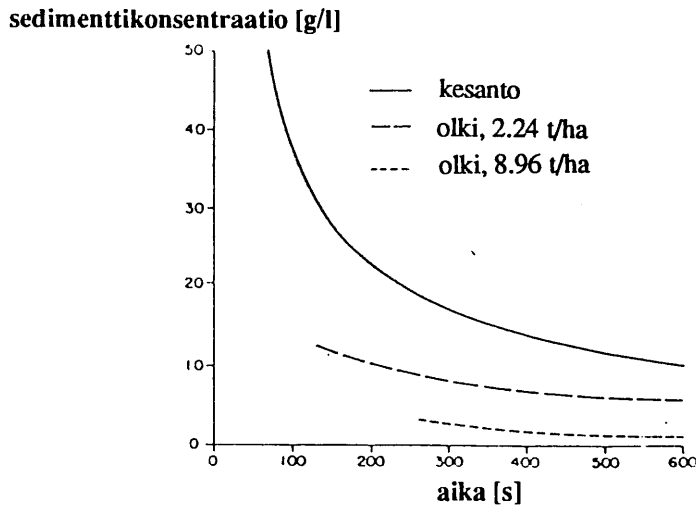


Kuva 25. Eroosiomäärät kynnetyltä (k), suojamuokatulta (sm, keskiarvo *chisel plow*-, *disk*-, *till-plant*- ja *rotary-till* -menetelmistä) ja ilman muokkausta (suorakylvö, sk) viljeltäviltä pelloilta, kun niiden kaltevuudet ovat 5 % ja 10 % ja maalajit hiesusavi (*silty clay loam*) ja hiesu (*silt loam*) (Dickey et al. 1984).

Aurakyntö aiheutti molemmilla kaltevuuksilla eniten eroosiota ja pienin eroosio syntyi muokkaamattomalta pellolta. Dickey et al. (1985) saivat vastaavia tuloksia toisessa kokeessaan: aurakyntöön verrattuna suorakylvömenetelmällä viljellyn pellon eroosio oli parhaimmillaan 68 % pienempi, kun pellon kaltevuus oli 5 %. Kun kaltevuus oli 10 %, pienentyi eroosio 94 %. Tuloksien perusteella Dickey et al. (1985) päättelivät, että 20 % korjuujäännöspeitolla eroosio pienenee puolella siitä määrästä, joka syntyy, kun pellon peitto on 2 %. Samanlaisen tutkimuksen perusteella Johnson et al. (1979) tulivat siihen tulokseen, että eroosio on kääntäen verrannollinen peiton määrään.

Korjuujäännösten eroosiota pienentävä vaikutus perustuu infiltraation kasvattamisen lisäksi siihen, että ne pienentävät valunnan energiaa lisäämällä pinnan epätasaisuutta. Pellon pinnalle jäävän kasviaineksen määrä vaihtelee kasvilajin, sadon suuruuden ja muokkaustavan mukaan. Dickey et al. (1984) mukaan suhteellinen kasvipeitto suoja- muokatulla maissipellolla vaihtelee 2...69 ja vehnäpellolla se on n. 22, jos auralla kynnetyn pellon peitto on 1. Jennings et al. (1985) vertasivat erilaisten maan pinnalle levitettävien materiaalien vaikutusta eroosioon laboratoriossa. Tulokset osoittavat selvästi, että kasvinjäännösmäärän kasvu viivästyttää pintavalunnan syntyä ja vähentää sen eroosivoimaa (kuva 26).



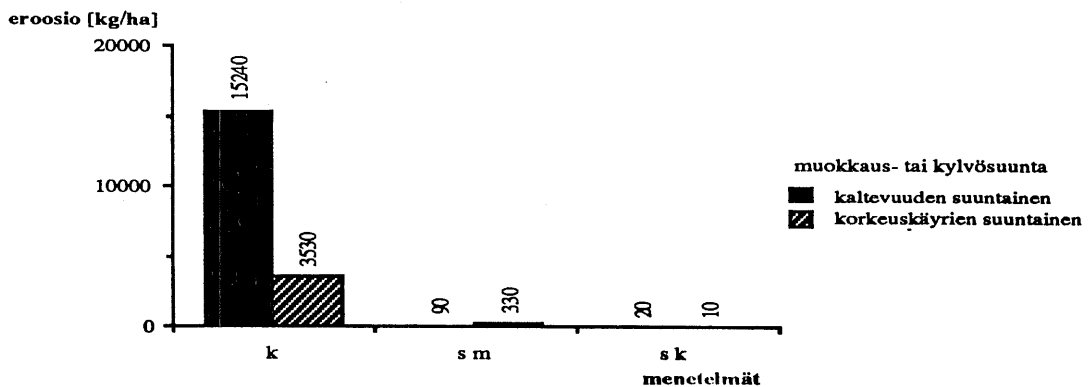


Kuva 26. Valumaveden sedimenttikonsentraation kehitys ajan suhteen kahdella eri kauranolkimäärällä ja paljaalla maalla, kun sateen intensiteetti on 135 mm/h, maa hiesusavea (*silty clay loam*) ja maanpinnan kaltevuus 2 % (Jennings et al. 1985).

Pellon pinnan epätasaisuuden vaikutus eroosioon näkyy selvästi Ulénin (1985) Ruotsissa saamista tuloksista: lumen sulamisvesien synnyttämä eroosio kynöksellä olevalla pelloilla oli huomattavasti pienempi kuin pelloilla, joille oli kylvetty syysvilja. Tämä johtui siitä että syksyllä kylvetty maa oli keväällä tasainen ja suojatton, ja pintavalunta syntyi helposti. Allmaras et al. (1985) saivat kokeissaan vastaavia tuloksia. Hän havaitsi valunnan syntyyn tarvittavan kynnetyllä pellolla 100 mm enemmän sadetusta kuin kynnetyllä ja tasaiseksi äestetyllä ja haratulla pellolla.

#### 4.4.1.2 Muokkaussuunta

Muokkaussuunta voi vaihdella korkeuskäyrien suuntaisesta kaltevuuden suuntaiseen. Dickey et al. (1983) vertasivat kynnon, suojamuokkauksen ja suorakylvön synnyttämiä eroosiomääriä eri muokkaus- ja kylvösuunnilla hiesupellolla (*silt loam*), jonka kaltevuus oli 4 %. Pellolla viljeltiin vehnää. Sadetusintensiteetti oli 63.5 mm/h ja sateen annettiin jatkua niin kauan, kunnes valunta saavutti tasapainon. Toimenpiteiden jälkeiset eroosiomäärät 76 mm sateen jälkeen on kuvattu graafisesti:



Kuva 27. Muokkaussuunnan vaikutus eroosioon kynnetyllä (k) ja suojamuokkatulla (sm, *stubble mulch*) pellolla ja kylvösuunnan vaikutus suorakylvössä (sk) (Dickey et al. 1983).

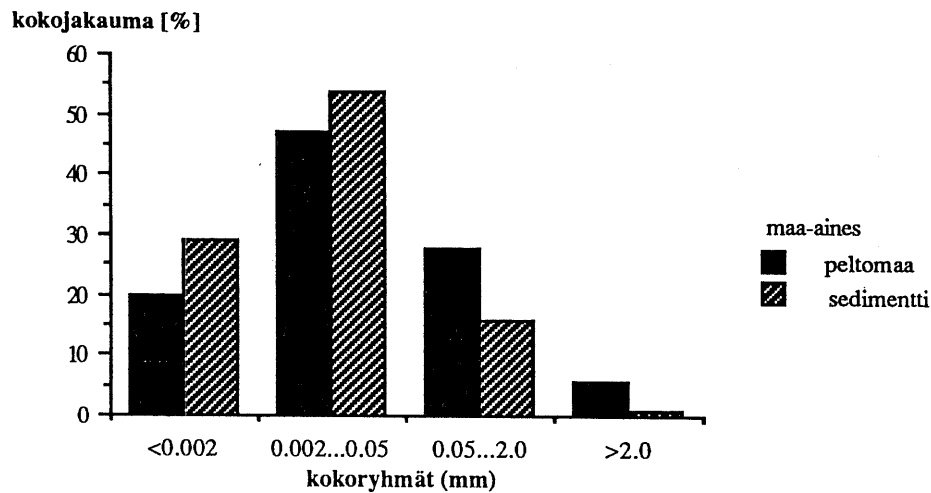
Tuloksista havaitaan, että huonoin muokkausvaihtoehto on kaltevuuden suuntainen kyntö. Sen suunnan muuttaminen korkeuskäyrien suuntaiseksi pienentää eroosiota 77 %. Eroosio ilman muokkausta viljeltäessä on merkityksettömän pientä molemmilla suunnilla. Vastaavassa tutkimuksessa Jasa et al. (1986) vertasivat suunnan vaikutusta hiesusavi- (*silty clay loam*) ja hiesupelloilla (*silt loam*), joiden kaltevuudet olivat 5 ja 10 %. Sateuksen intensiteetti oli 63.5 mm/h. Korkeuskäyrien suuntaisesti muokatun pellon pinta-valunnan syntyyn kulunut aika oli n. 2.5-kertainen kaltevuuden suuntaiseen muokkaukseen verrattuna, kun pellon kaltevuus oli 10 %. Kaltevuuden ollessa 5 % vastaava aika oli n. 1.5 kertainen. Valunnan määrä edellisessä tapauksessa pieneni 45 % ja jälkimmäisessä keskimäärin 25 %. Eroosiomäärien muutokset noudattelevat muutoksia valunnan määrässä. Molemmilla pelloilla 50 mm sateen jälkeen kaikkien muokkausmenetelmien eroosiomääristä lasketut keskiarvot olivat n. 73 % pienempiä korkeuskäyrien suuntaisessa muokkauksessa. Sateen jatkuessa erot eroosiomäärien välillä pienenevät: kun pintavalunta oli kestänyt 45 min, kaikkien menetelmien synnyttämien eroosiomäärien keskiarvo oli korkeuskäyrien suuntaisessa muokkauksessa 47 % pienempi kaltevuuden suuntaiseen muokkaukseen verrattuna jyrkemmällä pellolla. Vastaava ero loivemmalla pellolla oli 71 %. Samoin kuin Dickeyn et al. (1983) tutkimuksessa saatiin eroosiota pienennettyä eniten aurakynnön suunnan muutoksella (83 %) ja vastaavasti eroosio oli pienintä ilman muokkausta viljeltäessä.

Korkeuskäyrien suuntaisen muokkauksen teho perustuu maan varastotilan kasvuun. Lisäksi valunnan suunnassa poikittain olevat vaot estävät sen nopeuden ja määrän kasvun pienentäen siten veden irroitus- ja kuljetuskapasiteettia. Jos sade- tai sulamisvesistä kertyy vettä niin vähän, että vaot eivät täyty, ei eroosiota tapahdu juuri lainkaan. Päinvastaisessa tapauksessa veden virratessa vaon reunojen yli saattaa eroosiomäärä kohota hyvin suureksi (Foster 1982). Kasvin jäännösten vaikutus korkeuskäyrien suuntaisessa viljelyssä on pieni (Dickey et al. 1983). Pekkarinen (1979) havaitsi eroosion olevan keväisin poikkeuksellisen suurta pelloilta, jotka oli kynnety vieton suuntaisesti, koska sulamisvedet pääsivät routaantuneessa maassa lähes esteettä virtaamaan kyntöurissa.

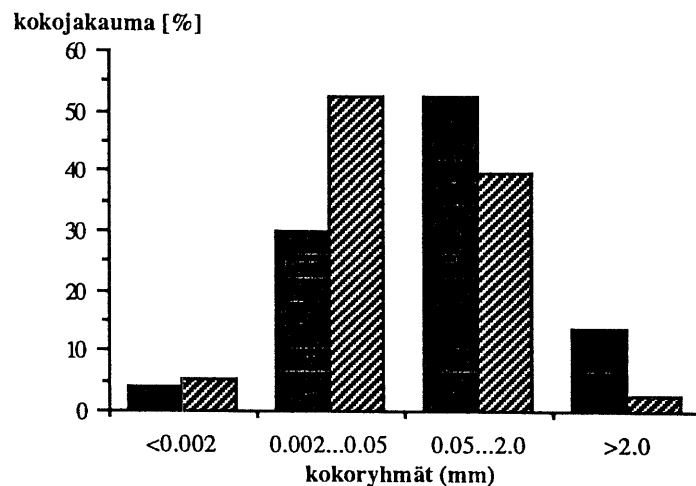
#### 4.4.1.3 Muokkauksen vaikutus sedimentin kokojakaumaan

Deizman et al. (1987) vertasivat erodoituvan sedimentin kokojakaumaa ilman muokkausta viljeltävältä ja normaalisti muokatulta pelloilta. Peltomaa oli hiesua. Kuvassa 28 on esitetty muokkauskerroksen ja erodoituneen sedimentin raekokojakaumat molemmille muokkausmenetelmille.

(A)



(B)

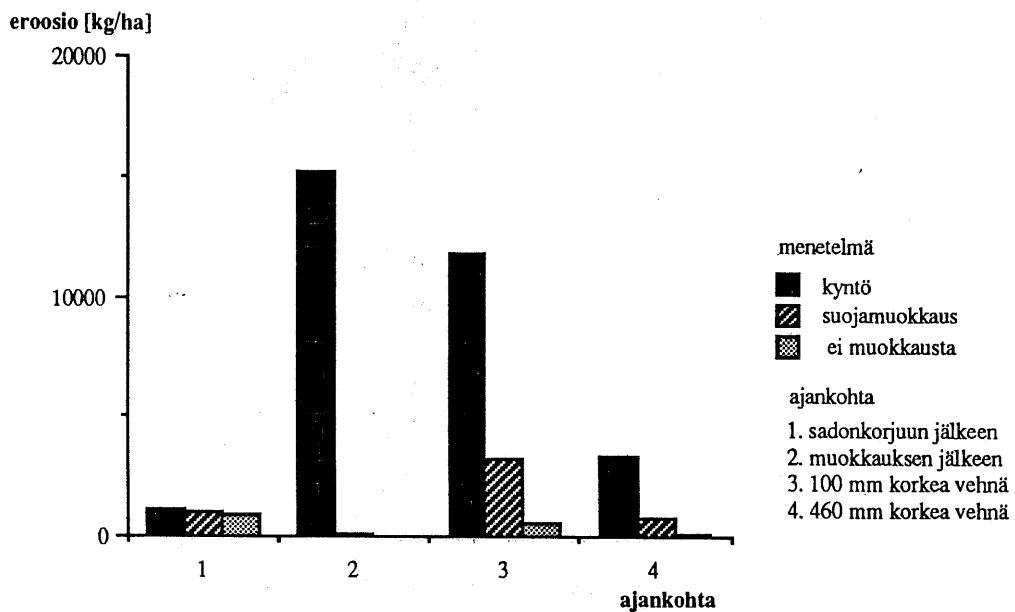


Kuva 28. Peltomaan ja erodoituneen sedimentin partikkeleiden kokojakaumat muokatulta (A) ja ilman muokkausta viljeltävältä (B) pellolta. (Deizman et al. 1987).

Tuloksista nähdään, että hienoaineksen rikastumista tapahtui kummallakin viljelymenetelmällä. Sateen toistuminen lisäsi suurten aggregaattien osuutta erodoituneessa sedimentissä samoin molemmissa tapauksissa, mutta vaikutus oli voimakkaampi normaalisti muokatulla maalla. Pellon kaltevuuden pienentymisen havaittiin kasvattavan pienimpien partikkelien osuutta valumavedessä. Tämä johtui valumaveden nopeuden ja kuljetuskapasiteetin pienemisestä loivenemisen myötä. Sedimentin karkean aineksen osuus kasvoi pellon kasvinjäännöspeiton kasvaessa. Tähän vaikutti ilmeisesti hienoaineksen suotautuminen maahan sekä se, että kasvinjäännökset suojasivat aggregaatteja sadepisaroiden iskulta. Tulosten perusteella Deizman päätteli, että kaikista sedimentin kokojakaumaan vaikuttavista tekijöistä suurin merkitys oli muokkauksella.

#### 4.4.1.4 Vaikutuksen muuttuminen

Yleisesti tiedetään, että eroosioriski on pahimmillaan pellon ollessa paljaana ilman kasvavaa kasvia. Dickey et al. (1983) mittasivat maan erodoituvuutta vehnän viljelyn eri vaiheissa kolmella eri muokkaustavalla hiesupellolla (*silt loam*). Tulosten vertailemisen mahdollistamiseksi valunta synnytettiin sadettimella. Sateen intensiteetti oli 63.5 mm/h ja sadetusta jatkettiin niin kauan, kunnes valunta saavutti tasapainon. Ylensä sadetus kesti n. 90 min. Tulokset on esitetty graafisesti kuvassa 29.

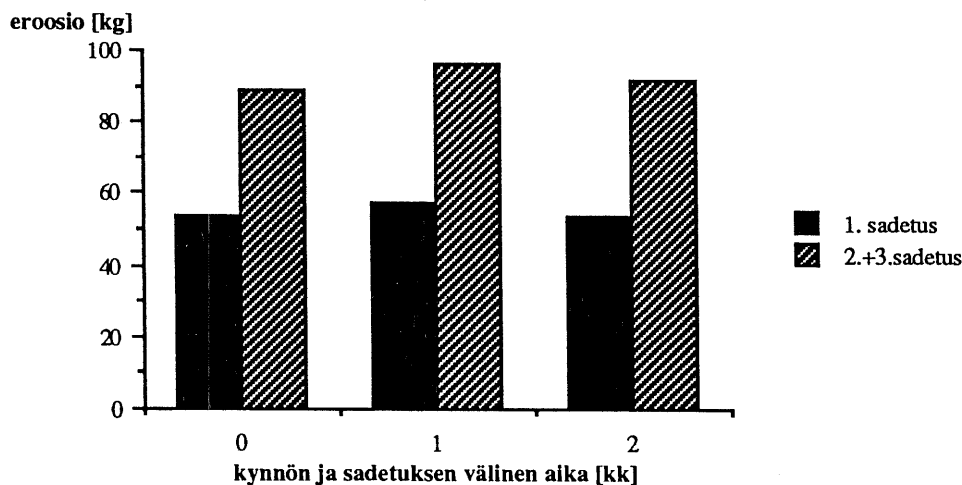


Kuva 29. Eri muokkaustapojen vaikutuksen kesto eroosion suuruuteen nähden vehnäpellolla, jonka kaltevuus on 4 % ja maa hiesua (*silt loam*) (Dickey et al. 1983).

Maa on eroosioherkin heti kynnön jälkeen. Suojamuokkaus ei sen sijaan lisää maan erodoituvuutta. Erot viljelymenetelmien välillä pienenevät kyntämällä viljeltävän pellon kasvi-  
peiton kehittyessä. Heti korjuun jälkeen ero ei enää ole merkittävä. Eroosion kasvu suojamuokatulla ja muokkaamattomalla pellolla 3. ja 4. vaiheen aikana johtuu kasvinjäännösten antaman suojan pienentymisestä. Pienenemisen aiheuttavat toistuvat sateet.

Mutchler ja Murphree (1988) selvittivät kynnön vaikutuksen muuttumista ajan suhteen kahden sadetusjakson avulla. Koepellon kaltevuus oli n. 3 % ja maa hiesua (*silt loam*). Muokkaus tehtiin joko samana päivänä ensimmäisen sadetuksen kanssa, kuukausi ennen sadetusta tai kaksi kuukautta ennen sadetusta. Muokkauksen ja ensimmäisen sadetuksen välisenä aikana maa peitettiin suojakankaalla. Yksi sadetusjakso koostui kolmesta osasta: ensimmäinen osa kesti tunnin (*dry run*) ja seuraava sadetus (*wet run*), joka kesti 30 min, tehtiin 4 h kuluttua ensimmäisen sadetuksen päättymisestä. Kolmas sadetus (*very wet run*), jonka kesto oli 30 min, tehtiin 30 min toisen sadetuksen jälkeen. Kunkin sadetuksen intensiteetti oli 63.5 mm/h. Tulosten tarkastelussa yhdistettiin kahden

viimeisen sadetuksen tulokset. Kuukauden kuluttua muokkauksesta ja ensimmäisestä sadetusjaksosta tehtiin toinen samanlainen sadetusjakso. Eroosiomäärät muokkausta edeltäville eripituisille ajoille on esitetty graafisesti (kuva 30).



Kuva 30. Eroosiomäärät eripituisilla muokkauksen ja sateen välisillä ajoilla hiesupellolla (*silt loam*) jonka kaltevuus on n. 3 % (Mutchler & Murphree 1988).

Tuloksista nähdään, että kynnön ja sadetusjakson välisen ajan pituudella ei ole vaikutusta eroosion suuruuteen, jos ko. välillä ei sada vettä. Sen sijaan lyhyen ajan sisällä toistuvien sateiden eroosiota lisäävä vaikutus näkyy selvästi: eroosio kasvoi keskimäärin 67 % toisella ja kolmannella sateella. Ensimmäisestä sateesta kuukauden kuluttua suoritettu sadetus lisäsi valunnaa ja eroosiota keskimäärin 17 ja 39 %. Deizman et al. (1987) saivat tutkimuksissaan samansuuntaisia tuloksia. Lisäksi hän huomasi, että ilman muokkausta viljellyllä pellolla eroosio vaihteli vain vähän sateiden toistumisesta huolimatta.

Eroosion kasvu sateiden toistumisen myötä johtuu varastotilan täyttymisen lisäksi siitä, että ensimmäisen sateen aikana maahan syntyy noroja, joissa seuraavien sateiden synnyttämän valunnan eroosiovoima kasvaa suureksi. Fosterin (1982) mukaan osasyynä pienen eroosiomäärään valunnan alussa on myös muokkauksessa syntyneiden pienten painanteiden täytyminen sedimentillä. Niiden täytyttyä kasvaa eroosioaineksen poiskulkeutuminen.

#### 4.4.2 Kasvipeitto

Maanviljelyssä pelto on suuren osan ajasta ilman suojaavaa kasvipeittoa, vaikutus näkyy hyvin aiemmin esitetystä Dickeyn et al. (1983) tutkimuksesta: samalla kun vehnän kasvu edistyy, eroosio pienenee (kuva 29). Zachar (1982) on koontanut Tsekkoslovakiassa yksittäisten valuntatapahtumien synnyttämiä eroosiomääriä erilaisilta kasvipeitoilta muuten samantyyppisiltä pelloilta (taulukko 3). Arvoja tarkasteltaessa on huomattava, että taulukossa esitetty kahden eri kasvi- tai pintatyyppin keskinäinen vertailu on ainoastaan mahdollinen,

esim. kevätvalunnan tiheällä apilapellolla synnyttämää eroosiota ei voida verrata rankkasateen ruispellolla aiheuttamaan eroosioon.

Taulukko 3. Kasvillisuuden ja pinnan laadun vaikutus eroosioon (Zachar 1982).

Eroosion aiheuttaja	kasvi/käsittely	eroosio [m <sup>3</sup> /ha]	suhteellinen eroosio
kevätvalunta	syysvilja	27.7	100.0
	tiheä apila	14.4	52.2
rankkasade	peruna	235.9	100.0
	ruis	10.4	4.5
rankkasade	peruna	182.2	100.0
	apila	5.0	2.7
rankkasade	peruna	632.1	100.0
	vehnä	21.7	3.5
koko kasvu- kauden sadanta	kesanto	125.9 [t/ha]	100.0
	osittainen kasvipeitto	19.7 [t/ha]	15.6
	täydellinen kasvipeitto	0.2 [t/ha]	0.16

Seuraavassa on taulukoitu suhteellisia eroosiomääriä kasvilajeittain kesantoon verrattuna USAssa Beasley et al.(1984) esittämien lukujen perusteella ja yleisesti koko maapallolla Zacharin (1982) arvion mukaan:

Taulukko 4. Pellon kasvipeiton vaikutus eroosioon, kun eroosiomäärä paljaalta kesannolta on 1.0 (Beasley et al. 1984; Zachar 1982)

<i>Kasvipeiton laatu</i>	<i>Suhteellinen eroosio</i>	
	<i>Beasley et al. (1984)</i>	<i>Zachar (1982)</i>
kesanto	1.0	1.0
rivikasvi	0.4	-
sokerijuurikas	-	0.85
juuri- ja mukulakasvit	-	0.50...0.80
vilja	0.1	-
syysvilja	-	0.05...0.35
kevätvilja	-	0.30...0.50
niitty	0.006	-
1-vuotinen ruoho	-	0.01...0.05
useampivuotinen ruoho	-	0.005
hedelmätarha	-	0.80...0.90

Taulukoissa 3 ja 4 esitetyt luvut ovat vuotuisia arvoja. Numeroarvoihin tulee suhtautua varauksella, koska esim. kesantotyypistä tai muokkauksen ajankohdasta ei ole tietoa. Arvot osoittavat selvästi kasvien synnyttämän lehvistösuojan ja maata sitovien juurien

pienentävän eroosiota. Korjuujäännösten tavoin myös kasvavat kasvit vähentävät pintavalunnan nopeutta (Foster 1982; Beasley et al. 1984). Kasvien järjestys rinteellä vaikuttaa paljon valunnan ominaisuuksiin: paljas ja huonosti vettä läpäisevä maa aiheuttaa suuren pintavalunnan, joka saattaa aiheuttaa eroosiota ala- puolisilla pelloilla. On todettu, että niityn alapuolisella pellolla eroosio saattaa olla 5...20 kertainen verrattuna olosuhteisiin, joissa pellon yläpuoli on metsää (Zachar 1982).

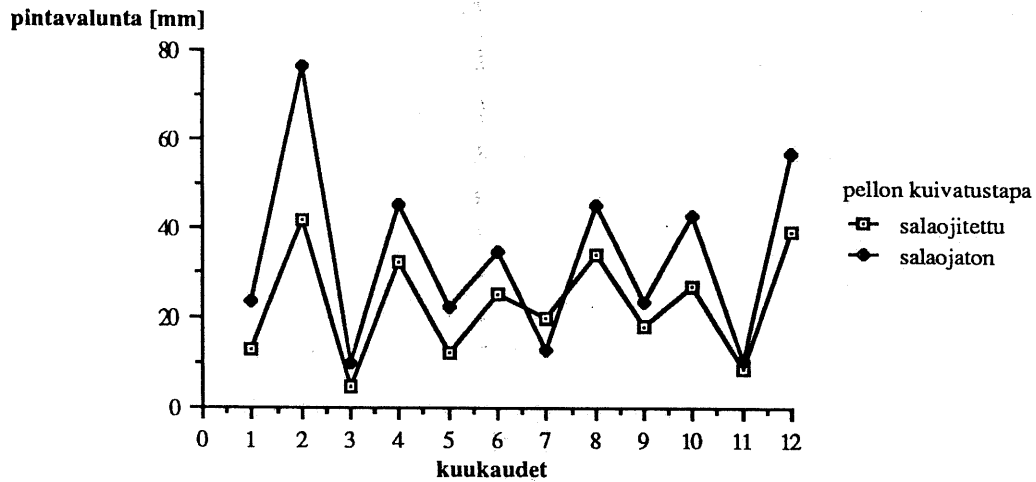
Luonnon kierrossa ja myös suojamuokkauksessa kuolleet kasvinosat hajoavat maahan ja lisäävät sen orgaanisen aineksen pitoisuutta ja parantavat pieneliöstön elinoloja, joista puolestaan seuraa maan rakenteen kohentuminen. Kasvien juuret ottavat maasta vettä ja haihduttavat sitä ilmaan. Näin maan vesivarasto pysyy tyhjänä ja suuri infiltraatio pienentää pintavaluntaa (Hallsworth 1987; FAO 1978). Esimerkiksi Ulén (1985) havaitsi Ruotsissa tekemissään tutkimuksissa heinäa kasvavan koekentän synnyttävän pienemmän kevätvalunnan kasvittomaan kenttään verrattuna. Tämä johtui siitä, että vielä syksyllä kasvillisuus haihdutti maasta niin paljon vettä, että muodostuneen roudan vedenläpäisevyys oli vertailukenttään nähden huomattavasti suurempi. Koekenttien maa oli savea. Kasvillisuuden infiltraatiota lisäävä vaikutus perustuu myös makrohuokosiin, joita hajoavat juuret jättävät maahan (Beasley et al. 1984).

#### 4.5 Kuivatustapa

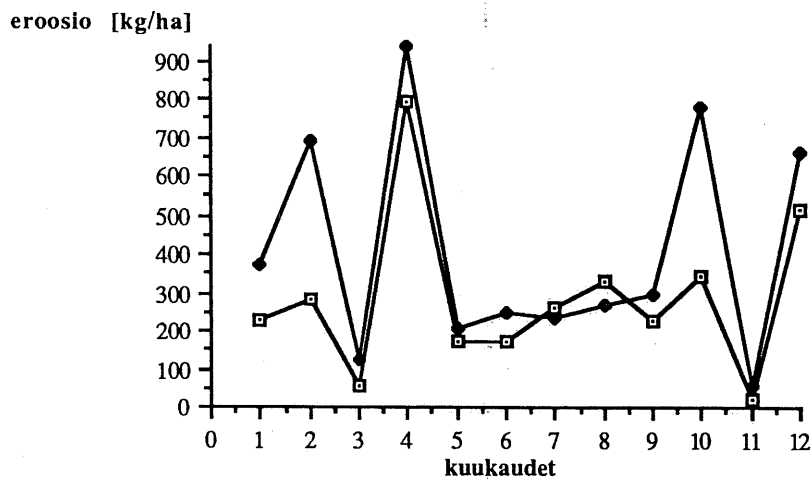
Bengtson et al. (1984;1986) vertasivat eroosiomääriä Lousianassa sijaitsevilla ojittamattomilla ja salaojitetuilla koepelloilla. Peltojen kaltevuus oli 0.1 %, maa hiuesavea (*clay loam*) ja niillä viljeltiin maissia. Viiden havaintovuoden aikana vuosisadanta vaihteli 1162...1811 mm. Keskimääräiset vuotuiset pintavalunnat salaojitetulta ja ojittamattomalta pellolta olivat 277 mm ja 404 mm, eli salaojitus vähensi pintavaluntaa 32 %. Ojittamattoman pellon pintavalunta kesti keskimäärin 6 h kauemmin salaojitettuun peltoon verrattuna.

Keskimääräinen vuosieroosio salaojitetulta pellolta oli 3398 kg/ha, mikä oli 30 % pienempi ojattoman pellon eroosioon verrattuna. Kiintoaineesta 11 % tuli salaojien kautta. Maan muokkaus aiheutti suuria eroja kiintoaineskulkeutumiin eri vuosien välillä. Esimerkiksi v. 1981 maata ei muokattu syksyn ja talven aikana ja sillä oli ruohopeite. Seuraavana vuonna maa muokattiin perusteellisesti, jolloin eroosio kasvoi yli kolminkertaiseksi v. 1981 verrattuna. Vaikka sademäärä v. 1982 oli 7 % edellistä vuotta pienempi, muokkaus lisäsi salaojavaluntaa 143 % edellisvuoteen verrattuna. Kuvassa 31 on esitetty pintavaluntojen ja eroosion kuukausikeskiarvot v. 1981...1985.

(A)



(B)



Kuva 31. Kuukausittaiset keskimääräiset pintavalunnat (A) ja eroosiomäärät (B) salaojitetulta ja salaojattomalta pellolta Bengtsonin et al. (1986) mittausten perusteella v. 1981-1985.

Bottcher et al. (1981) saivat Indianassa hiesusavipellolla (*silty clay loam*) tekemissään tutkimuksissa samansuuntaisia tuloksia. Tehokkaasti salaojitetulla pellolla, jonka kaltevuus oli alle 1 % ja jonka reunat olivat ympäristöönsä jonkin verran korkeammalla estäen pintavalunnan synnyn miltei kokonaan, eroosio vaihteli 21...140 kg/ha. Määrä oli 70...97 % pienempi vastaavaan heikommin salaojitetun alueen eroosioon verrattuna, kun vuotuinen sademäärä oli keskimäärin 770 mm. Myös Schwab et al. (1980,1981) ovat saaneet vastaavia tuloksia.

#### 4.6 Johtopäätökset

Suomessa esiintyvien sateiden pienistä rankkuuksista johtuen peltojen eroosio ei pahimmillaankaan nouse haitallisen korkeaksi maanviljelyn kannalta. Eroosion suuruuden

entä vesien?



maassamme määräävät pintavalunnan ominaisuudet ja ajoittuminen. Suurin osa vuosivalunnasta tapahtuu keväällä ja syksyllä, jolloin peltomaa on yleensä erodoituvimmillaan. Kevätvalunnan aikana kasvillisuutta ei ole ehtinyt muodostua ja syyssateiden tullessa pellon pinta on paljaana sadonkorjuun ja muokkauksen jäljiltä.

Pellon kaltevuus ja vietonsuuntainen pituus vaikuttavat keskeisesti pintavalunnan ja eroosion määrään. Suuren kaltevuuden on todettu lisäävän eroosiota, mutta arvioita kriittisen kaltevuuden arvosta maassamme ei ole tehty. Pitkällä pellolla pintavalunta keräytyy noroiksi, jolloin eroosio kasvaa voimakkaasti. Tämä näkyy selvästi esim. Gilley'n et al. (1987) tutkimuksesta.

Pintavaluntaa voidaan säädellä kuivatuksen, muokkauksen ja kasvien avulla. Tehokas kuivatus pitää maan varastotilan suurena ja pellon pinnalle tuleva vesi suotautuu nopeasti maahan. Avo-ojiin vettä kulkeutuu eroosiota synnyttävänä pintavaluntana ja itse ojissa tapahtuu eroosiota. Arvioita avo-ojien osuudesta koko peltoalueen aiheuttamasta sedimenttikeruormasta ei ole tehty. USAssa tehdyissä kokeissa eroosiota on saatu vähennettyä salaojituksen ansiosta 30...97 %. Salaojien kautta ei ole havaittu kulkeutuvan merkittäviä määriä kiintoainesta.

Kasvava kasvi suojaa maata eroosiolta tehokkaasti. Tästä syystä optimaalisten kosteusolojen järjestäminen maahan salaojituksella pienentää eroosiota myös välillisesti. Kasvi haihduttaa kasvaessaan vettä ja pitää maan varastotilan suurena. Tämä lisää infiltraatiota ja pienentää pintavaluntaa. Kasvien juuret sitovat maata ja parantavat sen rakennetta lisäämällä murustumista. Muruinen maa on ihanteellinen kasvun kannalta ja murut erodoituvat primääripartikkeleita vähemmän. Myös hajoavat kasvinosat lisäävät murujen muodostumista ja parantavat veden suotautumista maahan. Eri kasvilajien kyky suojata maata kulumiselta vaihtelee (taulukko 3). Erot johtuvat lähinnä lehvästön peittämistä alasta ja juuriston ominaisuuksista. Esimerkiksi eroosio perunapelloilta on moninkertainen viljelytoon verrattuna. Pellon kesannointi on sedimenttikeruormituksen kannalta huonoin vaihtoehto ja nurmi vastaavasti paras (taulukko 4).

Muokkauksen perimmäinen tarkoitus on tehdä maan rakenne viljelykasveille suotuisaksi. Kasvien tai niiden jäännösten poistaminen ja maan pintakerroksen löyhdyttäminen poikkeuksetta lisäävät maan erodoituvuutta. Eri muokkausmenetelmien synnyttämät eroosiomäärät poikkeavat toisistaan paljon. Erot johtuvat korjuujäännösten määrästä pellon pinnalla, pinnan epätasaisuudesta ja maan löyhyydestä. Lukuisat tutkimukset osoittavat korjuujäännösten pienentävän eroosiota. USAssa saatujen kokemusten perusteella n. 20 % peitto pienentää eroosion puoleen paljaaseen peltomaahan verrattuna. Korjuujäännösten teho perustuu siihen, että ne vähentävät veden irrotusenergiaa vaimentamalla sadepisaroiden iskuja ja pienentämällä pintavalunnan nopeutta. Kun pintavalunnan

eteneminen hidastuu, sille jää enemmän aikaa suotautua maahan. Kuolleet kasvinosat vähentävät eroosiota välillisesti parantamalla maan rakennetta, jolloin kasvien kasvu ja maan eroosioresistanssi lisääntyvät.

Vaikka maan löyhdyttäminen lisää sen erodoituvuutta, ei sen vaikutus aina ole eroosiota kasvattava, koska veden suotautuminen maahan helpottuu ja pintavalunta pienenee. Jos muokkauksella on synnytetty maan pinnalle riittävästi painannevarastoja, joiden tilavuus ei ylity, eroosio jää olemattomaksi. Tämän takia kevätkylvälunnon synnyttämä eroosio on kynnöksellä olevalta pellolta selvästi pienempi verrattuna pinnaltaan tasaiseen syysviljapeltoon. Varastotilan merkitys näkyy selvästi, kun kyntösuunta muutetaan kaltevuuden suuntaisesta korkeuskäyrien suuntaiseksi. Tällä tavoin eroosiota on saatu pienennettyä 77...83 %. Erot muokkaussuuntien välillä pienenevät veden ja sedimentin täyttäessä varastotilan.

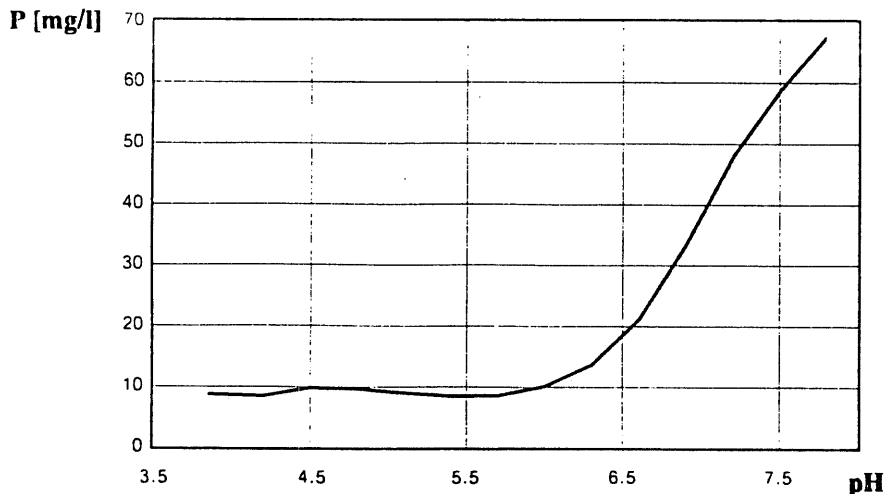
Luonnontilaisen maan rakenne pysyy hyvänä ilman ihmisen toimenpiteitä. Tämä johtuu mm. juurten, roudan ja maaeläinten maata sekoittavasta ja löyhdyttävästä vaikutuksesta. Routaa lukuunottamatta ei Suomessa muita luonnon omia maanhoitokeinoja hyödynnetä.

## 5. FOSFORIKUORMITUS

### 5.1 Määrä ja sitoutuminen

Suomessa maiden luontainen fosforipitoisuus on alhainen, koska happamista kivilajeista muodostunut kallioperämme on ollut fosforin suhteen köyhää maaperän raaka-ainetta. Maan primäärinen fosforilähde on apatiitti, jota on suurempina määrinä vain emäksisissä kivilajeissa. Fosfori on yksi kasvien tärkeimpiä ravinteita ja ne ottavat sitä useimmiten  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  - ja jonkin verran myös  $\text{HPO}_4^{2-}$ -muodossa. Kasvinravitsemuksen kannalta ongelmana on luontaisten fosforivarojen niukkuuden lisäksi se, että fosfori on suurelta osin kasveille käyttökelttomassa muodossa. Koska ilmastomme on lauhkeaa ja maaperämme nuorta, ei rapautuminen ole edennyt pitkälle ja fosforin vapautumista on tapahtunut huomattavasti vähemmän kuin lämpimämpien seutujen maaperässä. Rapautumisen vaikutus näkyy selvästi tarkasteltaessa fosforin esiintymistä eri maalajeissa. Mitä karkeampirakeista maa on sitä vähemmän siinä on tapahtunut rapautumista ja sitä suurempi osa fosforista on kasveille käyttökeltvotonta apatiittifosforia. Eri maalajien välillä fosforin kokonaismäärässä ei ole suurta eroa (Hartikainen 1984).

Toinen käyttökeltvoisen fosforin määrää pienentävä tekijä on sen sitoutuminen maahiukkasiin tai orgaaniseen ainekseen. Fosfaattit adsorptoituvat hydratoituneisiin metallioksideihin syrjäyttämällä niiden  $\text{H}_2\text{O}$  ja  $\text{OH}^-$ -ryhmiä (Hartikainen 1979). Suspension pH säätelee näiden ryhmien suhteellisia osuuksia, mikä taas osaltaan vaikuttaa hydratoituneen metallioksidin pinnan varaukseen: happamuuden kasvaessa vesiryhmien osuus lisääntyy ja varaus muuttuu positiivisemmaksi, mikä puolestaan lisää fosfaatti-ionien sitoutumista. Kähäriin et al. (1987) tutkimuksen mukaan peltomaan pH on Suomessa keskimäärin 5.84. Maan liukoisen fosforin pitoisuus on alhainen ja pitoisuuden muutokset ovat pienet, kun pH on alle 6.1, mutta pitoisuus lisääntyy hyvin voimakkaasti pH:n noustessa yli 6.4 (kuva 32).

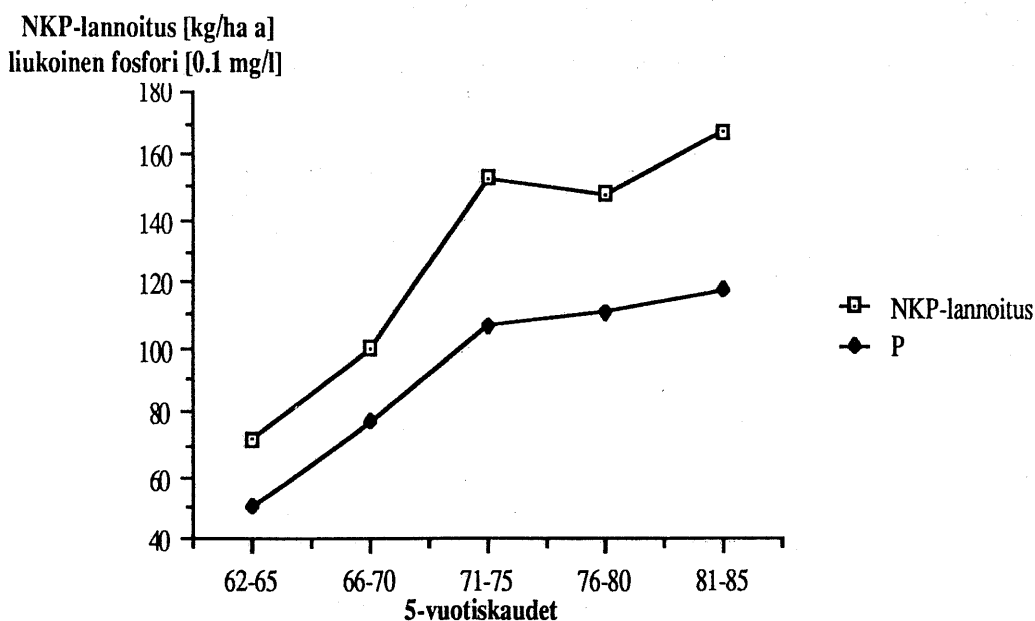


Kuva 32. Liukoisen fosforin pitoisuus eri pH-luokissa (Kähäri et al. 1987).

Yleistäen voidaan sanoa, että happamuuden pienentäminen kalkituksella parantaa epäorgaanisen fosforin käyttökelpoisuutta maassa (Hartikainen 1981,1983b). Kuitenkin Hartikainen (1981,1983b) havaitsi runsaasti vesiliukoista fosforia sisältävässä karkeassa hiedassa fosforin käyttökelpoisuuden pienenevän kalkituksen seurauksena. Tämä johtui siitä, että ko. näytteessä oli runsaasti orgaaniseen ainekseen sitoutunutta tai polymeroitunutta aluminiumia, jonka fosforinsitomistaipumus lisääntyi kalkittaessa. Lisäksi tehokkaan pH-puskuroinnin vuoksi OH-ionien pitoisuus ei ilmeisesti noussut riittävästi, jotta ne olisivat pystyneet merkittävästi kilpailemaan fosfaattien kanssa sorptiopaikoista (Hartikainen 1983a,1983b; Haynes 1982)

Maan fosforinsitomiskyky on suoraan verrannollinen sen savespitoisuuteen (Tisdale & Nelson 1975). Sitoutumisreaktioiden arvellaan olevan em. metallioksidien reaktioiden kaltaisia. Myös maan fosforipitoisuus vaikuttaa sitoutumiseen: mikäli maa on kyllästynyt fosforilla, ei sitoutumista voi tapahtua ja ylimääräinen aines jää liukoiseen muotoon (White 1979). Lisääntyneen lannoituksen vaikutus liukoisen fosforin määrään näkyy selvästi Viljavuuspalvelun tutkimuksesta (kuva 33). Toisaalta Hartikainen (1983a) havaitsi kokeissaan ravinnesuolojen lisäyksen pienentävän vesiliukoisen fosforin määrää massa.

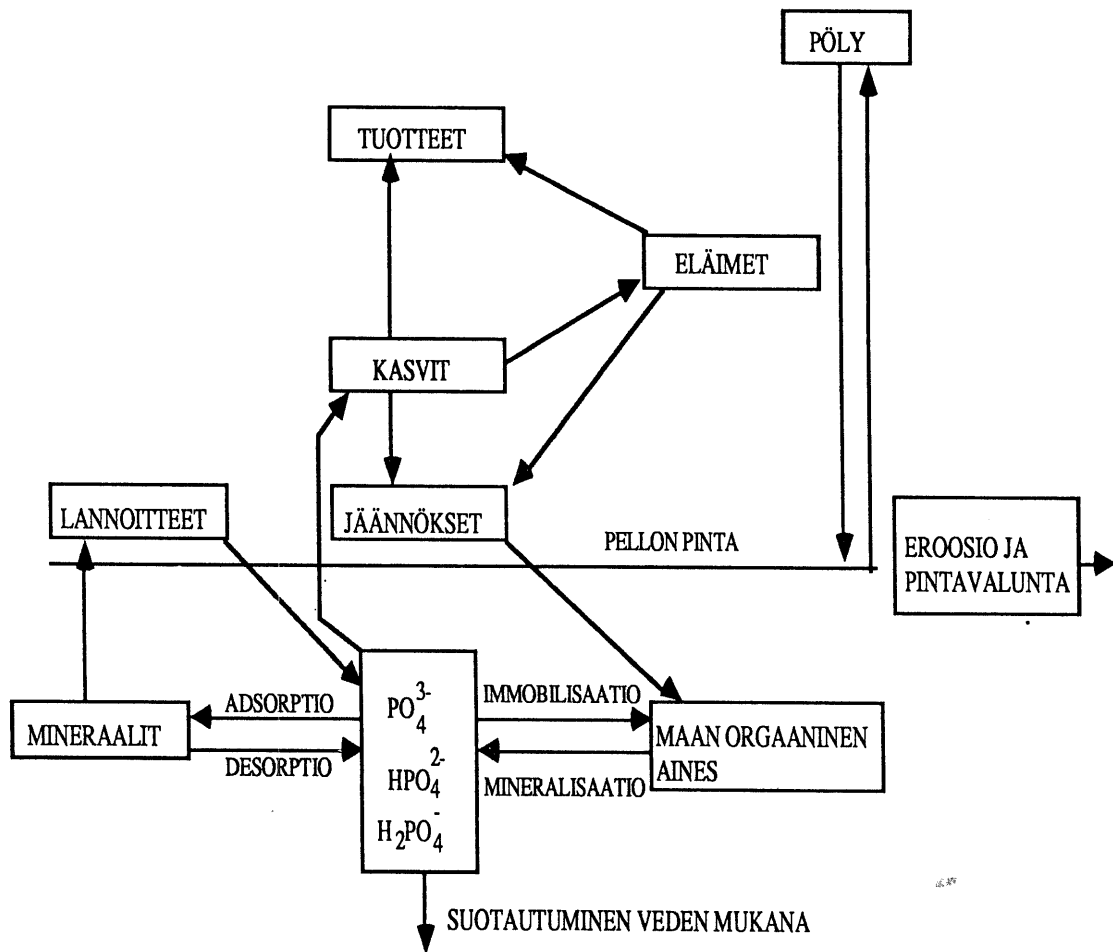
Vuosittain fosforia levitetään pelloille n. 31 kg/ha (Pellervo 1987) ja esim. ohra käyttää sitä keskimäärin 12 kg/ha (Cooke 1975, ref. White 1979). Mussaari esitti diplomityössään v. 1974, että savimaiden fosforipitoisuus lisääntyy lannoituksen vaikutuksesta 1 %:lla vuodessa, ja v. 1978 hän arvioi v. 1945 jälkeen peltomaahan jääneen lannoitefosforin määräksi n. 300 kg/ha (ref. Pekkarinen 1979).



Kuva 33. Liukoisen fosforin pitoisuuden (ammoniumasetattiutto) ja lannoitemäärien keskiarvot viisivuotiskausittain Suomen pelloilla (Kähäri et al.1987; Kemiran tilasto 1988).

## 5.2 Kulkeutuminen

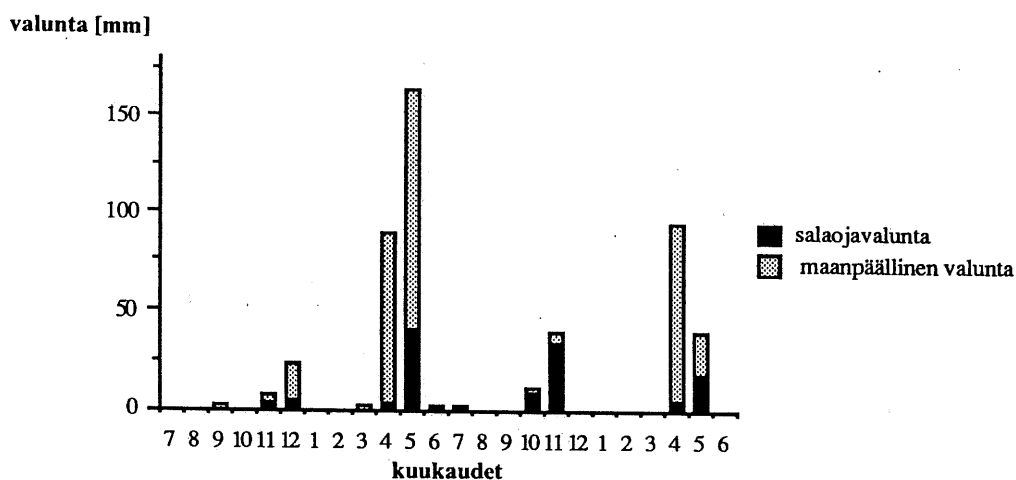
Seuraavassa on esitetty fosforin kierto pellolla Freren et al. (1982) mukaan:



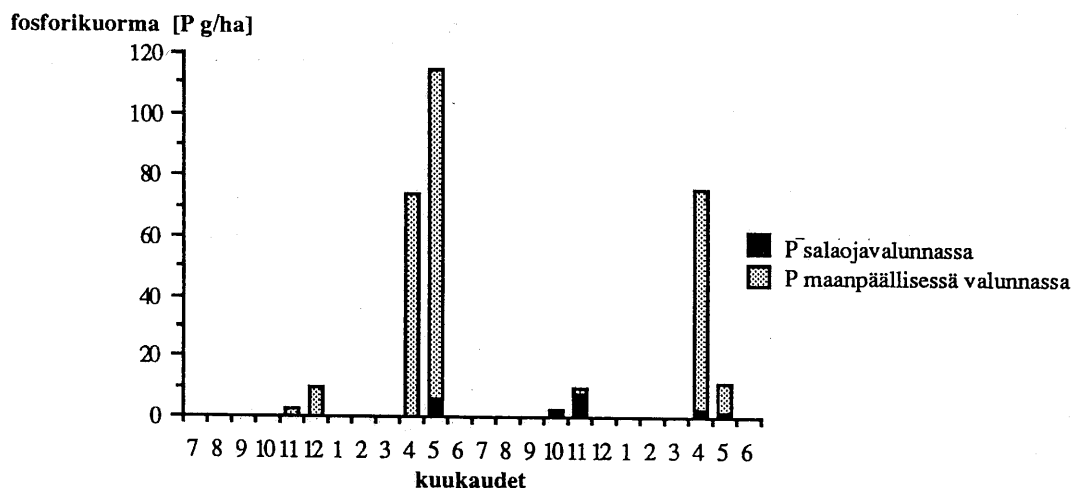
Kuva 34. Fosforin kierto pellolla (Frere et al. 1982).

Fosfori päätyy vesistöön joko valunnan tai ilmasta tulevan laskeuman mukana. White (1979) arvioi laskeuman määrän vaihtelevan 0.2...0.5 kg/ha a. Eroosion ja fosforikuormituksen välinen yhteys näkyy selvästi Brinkin et al. (1979) Ruotsissa koe-pellolla tekemästä tutkimuksesta (kuva 35). Peltomaa oli pääosin savista hietaa (*lerig mo*). Suurimmillaan kulkeuma on syysateiden aikana ja keväällä lumen sulamisen aikana, kun eroosio ja pintavalunta ovat suurimmillaan.

(A)



(B)

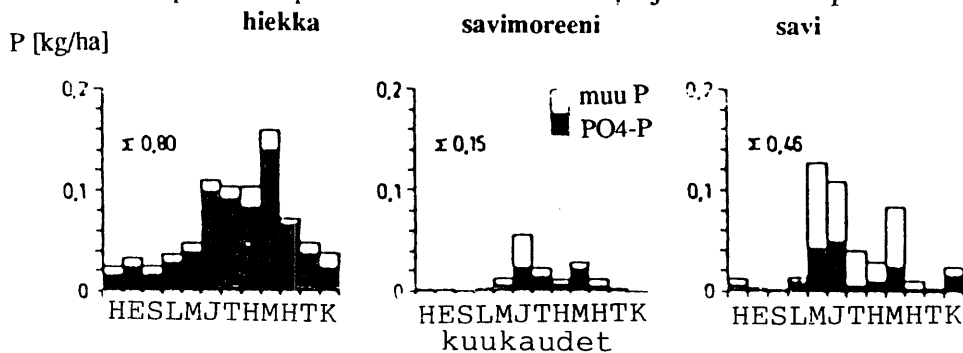


Kuva 35. Maanpäällinen ja salaojavalunta (A) sekä fosforikuormitus (B) Ruotsissa suoritetuissa mittauksissa. Kuvat piirretty Brinkin et al. (1979) tulosten perusteella.

Bengtson et al. (1984,1986) tutkivat Lousianassa pintavalunnan ja eroosion vaikutusta fosforikuormitukseen kahdella samanlaisella koepellolla, joista toinen oli salaojitettu ja toisen kuivatus hoidettiin avo-ojilla. Peltomaa oli hiesavea (*clay loam*). Kokonaisfosforikuorma salaojitetulta pellolta oli viiden vuoden mittauksen perusteella 33 % pienempi avo-ojitettuun peltoon verrattuna. Suurin osa fosforista oli sitoutunut maahiukkasiin ja kulkeutui niiden mukana pois pelloilta. Salaojaveden mukana kokonaisfosforikuormasta tuli vain 10 %. Bottcherin et al. (1981) Indianassa hiesusavipellolla (*silty clay*) tekemässä tutkimuksessa n. 70 % pellolta poistuvasta fosforista oli sitoutunut sedimenttiin ja salaojien kautta purkautuvan fosforin määrä oli merkityksettömän pieni pintavalunnan mukana kulkeutuvaan verrattuna. Brinkin et al. (1984) Ruotsissa suorittamissa mittauksissa partikkeleihin sitoutuneen fosforin määrä oli suurimmillaan 67 % kokonaisfosforipitoisuudesta ja Kaupin arvion (1984) mukaan on maassamme kiintoaineeseen sitoutuneen fosforin osuus kokonaiskuormituksesta n. puolet. Ulén

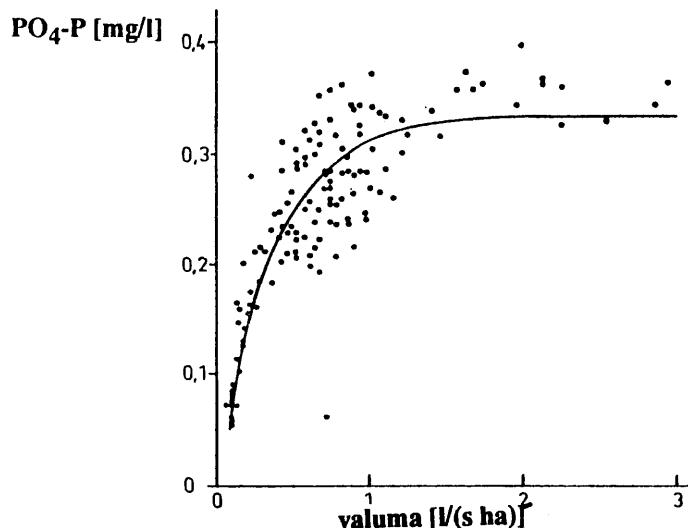
(1982,1985) arvioi, että Ruotsissa kokonaisfosforikuormasta puolet aiheutuu keväällä lumen sulamisvesien synnyttämästä eroosiosta. Mills et al. (1985) esittävät, että suuri osa pelloilta poistuvasta fosforista päätyy vesistöön eroosioainekseen sitoutuneena, koska liunneen fosforin pitoisuus maanesteessä on hyvin pieni. Mainittujen lisäksi samanlaisia tuloksia ovat saaneet mm. Gustafson (1982), Pekkarinen (1979) ja Mansikkaniemi (1982).

Pellon synnyttämä fosforikuormitus saattaa joissain tapauksissa nousta suureksi ilman eroosiotakin. Brink (1984) havaitsi karkearakeiselle maalle levitetyn lannoitteen synnyttävän suuren fosforikuormituksen, vaikka eroosiota ei tapahtunut. Gustafsonin (1982) mukaan eniten liukoista fosforia huuhtoutuu hiekkamaalta. Eri maalajien väliset erot ovat suuria (kuva 36). Huuhtoutumista tapahtuu etupäässä karkeilla mailla, koska vesi suotautuu helposti maaperään eikä fosforille ole paljoa sitoutumispintaa.



Kuva 36. Fosforikulkeuman määriä erilaisilta maalajeilta Ruotsissa (Gustafson 1982).

Joelssonin (1981) tulokset osoittavat valuman ja sen sisältämän fosforin määrän välillä vallitsevan selvän yhteyden, joka pienillä valuman arvoilla on lineaarinen (kuva 37). Myös Pekkarisen (1979) diplomityön mukaan fosforipitoisuus kevättulvan aikana yleensä kasvaa valuman kasvaessa ja graafisen tarkastelun perusteella pitoisuuden ja valuman välinen yhteys on lineaarinen. Tällä on suuri merkitys näytteenottoajankohtaa valittaessa, kun halutaan arvioida fosforikuormitusta.



Kuva 37. Valuman ja fosforipitoisuuden välinen yhteys (Joelsson 1981).

Eroosion merkitys fosforikuormituksessa korostuu lannoitettavassa. Suurimman kuormituksen aiheuttaa pintalevitys (Brink et al. 1979,1984; Gustafson & Torstensson 1984c; Baker et al. 1983). Erityisen suuri se on silloin, kun lannoite levitetään jäätyneelle maalle, esim. Gustafson ja Torstensson (1984b) mittasivat kuormitukseksi tällaisessä tapauksessa 4.04 kg/ha a. Kun lannoite sekoitettiin maahan kuormitus pieneni olemattomaksi. Myös Baker et al. (1983) havaitsivat lannoitetun pellon fosforikuormituksen olevan samaa luokkaa lannoittamattoman pellon kanssa, kun lannoite sekoitettiin tai injektoidiin maahan.

Johnson et al. (1979) vertasivat fosforikulkeumia suojamuokatulta ja normaalisti muokatulta pellolta ja havaitsivat kasvinjäännösten lisäävän liukoisen fosforin pitoisuutta valumavedessä. Syynä tähän oli se, että kasvinjäännökset estivät lannoitteen sekoittamisen maahan ja vapauttivat hajotessaan fosforia. Samoin Ulén (1984) havaitsi laboratorioskokeissa korjuujäännöksistä liukenevan fosforia. Jäännösten toistuva jäätyminen tai kuivuminen lisäsi huuhtoutumista. Ruohon ja rapsin jäätyminen vapautti n. 0.2 mg fosforia 1 g kasvin kuivapainoa kohden ja Ulén arvioi tämän vastaavan 0.7 kg fosforikuormitusta hehtaaria kohden. Tulosta tukee Ulénin (1985) heinää kasvavan ja kynnetyn pellon vertailu: fosfaattihuuhtoutuma heinäpellolta talven jälkeen oli selvästi suurempi.

Kauppi (1984) arvioi peltojen fosforikuormituksen olevan normaalisateisena vuonna Suomessa 0.57 kg/ha. Jokioisissa savimaalla v. 1976...1983 tehdyissä mittauksissa kuormitus vaihteli 0.4...1.5 kg/ha a, tosin suurimpaan arvoon on saattanut vaikuttaa korkeen osittainen epäonnistuminen. Ruotsissa Brinkin et al. (1979) arvio vaihteli 0.01...2.2 kg/ha a ja Ulénin (1982,1985) mittausten perusteella se on 0.13...0.88 kg/ha.

### 5.3 Johtopäätökset

Fosforilannoitus on ollut maassamme välttämätöntä maaperän vähäisen luontaisen fosforipitoisuuden ja fosforin sitoutumisen takia. Jatkuva ja tehokas lannoitus on kuitenkin johtamassa maan kyllästymiseen ja liukoisen fosforin määrän kasvuun (kuva 33). Kuitenkin vain pieni osa pellon aiheuttamasta fosforikuormituksesta on liukoisessa muodossa, suurin osa siitä on sitoutunut eroosioainekseen. Sitoutuminen on tehokkainta happamilla ja hienorakeisilla maalajeilla.

Kalkituksen vaikutus fosforin sitoutumiseen vaihtelee maan ominaisuuksien mukaan. Ilman maan happamuuden pienentämistä tietty osa lannoitefosforista sitoutuu maahan ja lannoitusmäärä on pidettävä korkeana. Jos fosforin käyttökelpoisuutta pystytään kalkituksella parantamaan, pienenee tarvittava lannoitteen määrä.



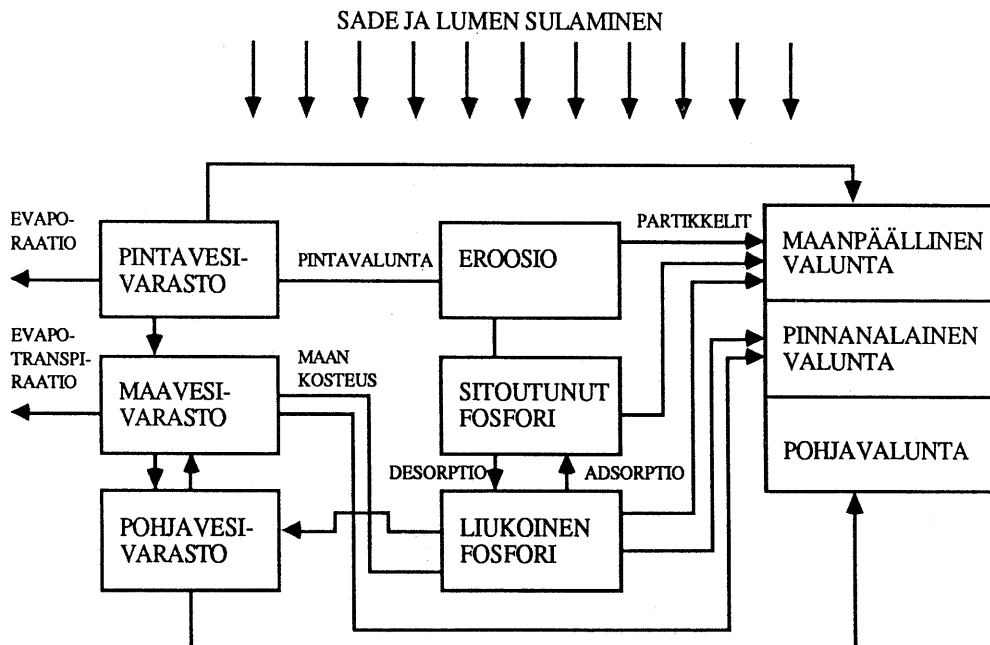
Koska fosforikuormitus on sidoksissa eroosioon, sen suuruuteen vaikuttavat osittain samat tekijät. Lannoitteen pintalevitys lisää eroosion aiheuttamaa fosforikuormitusta. Kuormitus pienenee huomattavasti, jos fosfori sekoitetaan peltomaahan. Toisaalta fosforin käyttökelpoisuus pienenee maan ravinnesuolapitoisuuden kasvaessa. Tästä syystä Suomessa käytettävä sijoituslannoitus ilmeisesti lisää tarvittavan fosforilannoitteen määrää. Pitkään jatkunut hienoaineksen eroosio vähentää fosforin sitoutumispintaa ja lisää liukoisen fosforin huuhtoutumisriskiä.

Vaikka kasvinjäännösten jättäminen pellolle pienentää eroosiota, ei niiden vaikutus kokonaiskuormitusta ajatellen ole yhtä selvä. Tämä johtuu siitä, että jäännökset estävät lannoitteen sekoittumisen maahan, jolloin se jää alttiiksi huuhtoutumiselle. Lisäksi hajoavat kasvinjätteet vapauttavat fosforia suuria määriä. Suomessa ongelmallisin aika on kevät, koska toistuva kasvinjätteiden jäätyminen ja sulaminen tehostavat fosforin vapautumista.

## 6. EROOSION JA FOSFORIKUORMITUKSEN MALLINTAMINEN

Hajakuormitusmallit ovat periaatteessa hydrologisia sadanta-valunta prosessin kuvauksia, joihin on liitetty veden laatukomponentti. Malleja on kehitetty etenkin USAssa lukuisa joukko. Niistä tunnetuimpia ovat Agricultural Chemical Transport Model (ACTMO), Agricultural Runoff Management Model (ARM), Unified Transport Model (UTM), Areal, Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Models (ANSWERS) ja Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems Model (CREAMS). Erot mallien välillä ovat lähinnä niiden hydrologisessa osassa. Kuvasta 38 selviävät fosfori-, eroosio- ja valuntakomponenttien väliset yhteydet. Eroosion ja fosforikuormituksen laskennan periaate on seuraava (Novotny & Chesters 1981):

1. Pintavalunnan muodostumisen kuvaus.
2. Maa- ja pohjavedeksi suotautuvan vesimäärän selvittäminen.
3. Eroosion suuruuden arvioiminen pintavalunnan ja sateen perusteella.
4. Sorptioituneen ja liuenneen fosforin määrän laskeminen.
5. Fosforikuormituksen laskeminen valunnan ja eroosiomäärän avulla.



Kuva 38. Hydrologian, eroosion ja fosforikuormituksen väliset yhteydet (Novotny & Chesters 1981).

Suomessa ei ole toistaiseksi tehty hajakuormitusmalleja, mutta Kauppi (1982) on kokeillut CREAMS-mallin soveltuvuutta olosuhteisiimme. Lisäksi Rekolainen ja Kauppi

(1988) arvioivat CREAMSilla kesannoimisen vaikutusta vesistökuormitukseen Suomessa. Näiden tutkimuksen perusteella ei kuitenkaan voida tehdä arvioita mallin käyttökelpoisuudesta maassamme. CREAMS on laadittu USA-laisiin ilmasto-, maaperä- ja viljelyolosuhteisiin. Esimerkiksi routa, lumen kertyminen ja sulaminen on jätetty kokonaan pois mallista. Lisäksi pintavalunta määritetään vrk-sadannan perusteella U.S. Soil Conservation Servicen kehittämällä käyränumeroyhtälöllä (Knisel 1980), jonka käyttökelpoisuutta maassamme ei ole tutkittu.

Seuraavassa on esitetty yleisimmät tavat eroosion ja fosforikuormituksen arvioimiseksi. Esitettyjen parametrien numeroarvot ovat suuntaa-antavia, kaavat tulee kalibroida olosuhteisiin sopiviksi. Tässä yhteydessä ei ole syvennytty kuormitusmallien sadanta-valunta-prosessin kuvaamiseen.

## 6.1 Eroosio

Bennett (1974) kuvaa pintaeroosiota jatkuvuusyhtälöllä :

$$\partial q_s / \partial x + \rho_s \partial (cy) / \partial t = D_r + D_l \quad (3)$$

$q_s$  = veden sedimenttipitoisuus (massa leveys- ja aikayksikköä kohden )

$\rho_s$  = sedimenttipartikkeleiden tiheys

$c$  = sedimenttikonsentraatio vedessä ( sedimenttimäärän tilavuus veden tilavuusyksikköä kohden )

$y$  = valuman syvyys

$t$  = aika

$D_r$  = noroeroosion tai sedimentoitumisen intensiteetti ( massa pinta-ala- ja aikayksikköä kohden )

$D_l$  = norojen välisiltä alueilta tuleva sedimenttimäärä ( massa pinta-ala- ja aikayksikköä kohden )

Yhtälössä oletetaan, että valunta ja sen sedimenttipitoisuus jakautuvat tasaisesti rinteelle ja  $q_s$ ,  $D_r$  ja  $D_l$  ilmaistaan koko alueen leveyttä kohden, vaikka prosessi tapahtuisikin rajoitetummalla alueella. Lisäksi otaksutaan norojen välistä irtoavan hienoaineksen päätyvän kokonaisuudessaan noroihin, joissa tapahtuu sedimentoitumista, jos virtaavan veden hienoainespitoisuus ylittää sen kuljetuskapasiteetin. Vastaavasti eroosiota syntyy, kun pitoisuus on kuljetuskapasiteettia pienempi ja virtauksen eroosiovoima on riittävä. Tästä syystä eroosio ja sedimentoituminen eivät voi tapahtua samanaikaisesti.

Termi  $\partial q_s / \partial x$  kuvaa sedimenttipitoisuuden muutosta matkan suhteen ja  $\rho_s \partial (cy) / \partial t$  tarkoittaa sedimentin varastoitumisnopeutta. Vakio-olosuhteissa yhtälö 3 saa muodon:

$$dq/dx = D_r + D_l \quad (4)$$

Foster et al. (1982, 1985) esittävät, että pintavalunnan synnyttämä eroosio ja siitä sedimentoituva ainesmäärä ovat suorassa suhteessa pintavalunnan sedimentin kuljetuskapasiteetin ja pitoisuuden erotukseen:

$$D = \alpha (T_c - q_s) \quad (5)$$

$\alpha$  = tietyn sedimenttiluokan laskeutumista tai irtoamista kuvaava kerroin (pituus<sup>-1</sup>)

$T_c$  = virtauksen sedimentinkuljetuskapasiteetti ( massa leveys- ja aikayksikköä kohden )

Eroosion intensiteetin otaksutaan olevan maksimissaan, kun vedessä ei ole sedimenttiä. Tällöin  $q_s = 0$  ja yhtälön 5 perusteella voidaan merkitä  $D_c/T_c = \alpha$ , missä  $D_c$  on eroosion maksimi-intensiteetti. Näin yhtälö 5 saa muodon :

$$(D/D_c) + (q_s/T_c) = 1 \quad (6)$$

Esitetyt yhtälöt ovat osoittautuneet soveliaiksi suspension laskeutumisen ennustamiseen, mutta eroosion laskemisessa ei ole saatu hyviä tuloksia. Foster (1982) ehdottaa pintavalunnasta tapahtuvan sedimentoitumisen arvioimiseksi kertoimelle  $\alpha$  arvoa :

$$\alpha = 0.5 V_s/q \quad (7)$$

$V_s$  = maapartikkelin laskeutumisnopeus  
 $q$  = virtaama leveysyksikköä kohden

Yhtälöille (3...6) ei useimmissa tapauksissa löydetä yleisiä ratkaisuja ja ne joudutaan ratkaisemaan numeerisesti. Monimutkaiset ongelmat voidaan kuitenkin ositella yksinkertaisiksi osatehtäviksi ja ratkaista analyyttisesti.

### 6.1.1 USLE -yhtälö

Pintaeroosion suuruuden arviointi perustuu useimmiten empiirisesti johdettuun USLE-yhtälöön (*the Universal Soil Loss Equation*). Se kehitettiin USAssa apuvälineeksi suunniteltaessa toimenpiteitä eroosion vähentämiseksi ja maan tuottavuuden säilyttämiseksi yli 40 vuoden ajalta kerättyjen koetulosten perusteella (Hudson 1971). Sitä käytetään mm. CREAMS-, ACTMO- ja LANDRUN-malleissa. Yhtälön yksinkertaisuuden ja sillä saatujen tulosten luotettavuuden johdosta sitä tullaan käyttämään vielä pitkään eroosion ennustamiseen (Follet & Stewart 1978). Wischmeier ja Smith (ref. Novotny & Chesters 1981) esittävät yhtälön seuraavassa muodossa :

$$A = R K L S C P \quad (8)$$

- $A$  = keskimääräinen erodoitunut maamäärä [t/ha]  
 $R$  = sateen eroosivoima  
 $K$  = maaperän eroosioherkkyys  
 $LS$  = pituus-kaltevuus -kerroin  
 $C$  = viljelytoimenpiteen vaikutusta kuvaava kerroin ( tietyn viljelytoimenpiteen aiheuttaman eroosiomäärän suhde vertailupellon eroosioon )  
 $P$  = eroosiota estäviä toimenpiteitä kuvaava kerroin ( tietyn toimenpiteen aiheuttaman eroosiomäärän suhde vertailupellon eroosioon )

Kertoimien määrittystä ovat käsitelleet mm. Hudson (1971), Zachar (1982), Novotny ja Chesters (1981) ja Beasley et al. (1984).

USLE-yhtälöllä voidaan arvioida vain eroosion kokonaismäärää; se ei erota toisistaan noroissa ja niiden välissä tapahtuvaa eroosiota. Yhtälöllä ei myöskään pystytä ennustamaan kanava- tai rotkoeroosion suuruutta. Laskettaessa USLE-yhtälöllä pitkän sadejakson synnyttämää eroosiota, käytetään eroosiovoimatekijän  $R$  tilalla muunnettua arvoa  $R_m$ , jonka laskemiseksi on useita erilaisia tapoja. Novotny ja Chesters (1981) esittävät käytettäväksi seuraavaa yhtälöä :

$$R_m = \sum [(2.29 + 1.15 \log X_i) D_i] I \quad (9)$$

- $i$  = sadantakäyrän aikajakso  
 $D_i$  = sadanta ajanjaksona  $i$  [cm]  
 $I$  = maksimaalinen 30 min intensiteetti [cm/h]  
 $X_i$  = sateen intensiteetti [cm/h]

Koska myös valunta vaikuttaa keskeisesti maapartikkelien irtoamiseen, ehdottaa Foster et al. (1977) sen huomioonottamista muunnetussa USLE-yhtälössä :

$$R = aR_m + 15bQq^{1/3} \quad (10)$$

- $a, b$  = painokertoimia ( $a + b = 1$ )  
 $Q$  = valunta [cm]  
 $q$  = maksimi valuma [cm/h]

Painokertoimet kuvaavat valunnan ja sadepisaroiden aiheuttamien eroosioiden suhdetta. Jos oletetaan niiden aiheuttama eroosio yhtä suureksi, saavat molemmat kertoimet arvon 0.5 ja yhtälö voidaan kirjoittaa seuraavasti :

$$R = 0.5R_m + 7.5Qq^{1/3} \quad (11)$$

Williamsin (1975, ref. Foster 1982) kehittämä muunnettu USLE-yhtälö soveltuu alkuperäistä paremmin arvioitaessa eroosiota, jonka yksittäinen valuma aiheuttaa suurella valuma-alueella. Yhtälössä korvataan USLE:n  $R$  tekijä  $R_w$  :llä:

$$R_w = 9.05 (V Q_p)^{0.56} \quad (12)$$

$$V = \text{valuman määrä [m}^3\text{]} \\ Q_p = \text{suurin valumanopeus [m}^3\text{/s]}$$

Esitetyt laskentamenetelmät eivät sellaisenaan sovellu alueille, joilla tapahtuu sedimentoitumista. Niillä USLE-yhtälöä käytettäessä on tarkasteltava valumaveden kuljetuskapasiteettia. Sateen synnyttämän valuman kokonaiskuljetuskapasiteettia voidaan arvioida Neiblingin ja Fosterin (1977, ref. Foster 1982) kokeellisesti johtamalla kaavalla:

$$T_c = 138 V q_p (\sin \theta)^{1.55} C_T \quad (13)$$

$$T_c = \text{kokonaiskuljetuskapasiteetti massana leveysyksikköä kohden (g/m)} \\ V = \text{kokonaisvalunta leveysyksikköä kohden [m}^3\text{/m]} \\ q_p = \text{huippuvaluma leveysyksikköä kohden [m}^3\text{/s m]} \\ \theta = \text{rinteen kaltevuuskulma} \\ C_T = \text{kasvillisuuden yms. vaikutusta pintavalunnan hydraulisiin voimiin kuvaava kerroin.}$$

Eroosiomäärän arviointi tulisi tehdä valuntatapahtuma kerrallaan; lisäksi pitäisi aina eroosiomäärän selvittämisen yhteydessä tutkia valunnan kuljetuskapasiteettia, jos alueella tapahtuu sedimentoitumista. USLE-yhtälö soveltuu parhaiten vuotuisen kokonaiseroosion arviointiin, mutta sen antama tulos ei kuvaa vesistöön päätyvää kiintoainemäärää. Malleja käytettäessä kohdealue on jaettava osiin, joiden olosuhteet ja ominaisuudet ovat samantyyppiset koko alueella.

### 6.1.2 Negevin yhtälö

Negevin yhtälö on USLE-yhtälöä tuntemattomampi. Sitä käytetään mm. Amerikkalaisen Hydrocomp-yhtön kehittämässä HSP-, NPS- ja ARM-malleissa. Irtoava partikkelimäärä lasketaan aika-askelittain kullekin osa-alueelle seuraavasti :

$$A(t) = (1 - COV) K_N P(t)^{RER} \quad (14)$$

$$A = \text{ajassa } t \text{ irronneiden partikkeleiden määrä} \\ COV = \text{kasvipeiton suhteellista osuutta kuvaava kerroin} \\ K_N = \text{maan ominaisuuksia kuvaava kerroin} \\ P = \text{sadanta aikana } t \\ RER = \text{eksponentti}$$

Irronneet partikkelit ovat välittömästi sateen alettua valunnan kuljetettavissa, mutta jos valuntaa ei synny, hienoainesta kertyy maan pintaan varastoksi, mistä myöhemmät valunnat sitä irrottavat. Tätä kuvataan seuraavasti :

$$SER(t) = KSER \cdot SRE(t-1) \cdot ROSB(t)^{SR} \quad (15)$$

$SER$  = ajassa  $\Delta t$  kulkeutuneiden partikkelien määrä  
 $KSER$  = kuljetuskerroin  
 $SRE(t-1)$  = aiemmin sedimentoituneiden partikkeleiden määrä  
 aika-askeleen  $\Delta t$  alussa  
 $ROSB$  = maanpäällinen valunta ajassa  $\Delta t$   
 $SR$  = eksponentti

Negevin mallin kalibroiminen melko hankalaa, koska siihen tarvitaan suuri määrä mittaustuloksia. Lisäksi kokemuksia ja tutkimuksia sen käyttökelpoisuudesta on vähän. (Novotny & Chesters 1981).

### 6.1.3 Sedimenttikuormituksen laskeminen

Valuma-alueelta purkautuva vuotuinen eroosioaineksen määrä saadaan selville  $DR$  :n avulla:

$$Y = DR \sum_k A_k P a_k \quad (16)$$

$Y$  = vuotuinen eroosioaineksen määrä [t/a]  
 $A_k$  = osa-alueen eroosiomäärä, esim. USLE-yhtälöstä  
 $P a_k$  = osa-alueen pinta-ala  
 $DR$  = kulkeutumiskerroin

Yhtälö ei sovellu lyhyiden valuntajaksojen arviointiin, koska eroosio ja maa-aineksen poiskulkeutuminen eivät aina tapahdu samanaikaisesti. Seuraavassa on esitetty eräs menetelmä valuma-alueelta kuukaudessa purkautuvan hienoainemäärän laskemiseksi (Mills et al. 1985).

Kuukauden hienoainekuorman  $Y_m$  oletetaan olevan suoraan verrannollinen sen valunnan (cm) 1.2:een potenssiin ( $Q_m^{1.2}$ ). Vuotuinen sedimenttikuorma  $Y$  on samalla tavoin suoraan verrannollinen  $QT$  :hen, joka määritellään seuraavasti :

$$QT = \sum_{m=1}^{12} Q_m^{1.2} \quad (17)$$

Edellisen perusteella voidaan kirjoittaa :

$$Y_m / Y = Q_m^{1.2} (QT)^{-1} \quad (18)$$

Kuukauden sedimenttikuormaksi saadaan:

$$Y_m = Q_m^{1.2} Y (QT)^{-1} \quad (19)$$

Vuotuinen sedimenttikuorma  $Y$  saadaan yhtälöstä 16.

## 6.2 Fosforikuormitus

Fosforikuormituksen mallintaminen on sedimenttikuormituksen kuvaamista hankalampaa, koska se voi tapahtua maanpäällisen-, pintakerros- ja pohjavesivalunnan mukana ja siihen liittyy jatkuvia monimutkaisia kemiallisia reaktioita. Lisäksi laadituilla malleilla saadaan hyvin epätarkkoja tuloksia (Mills et al. 1985).

### 6.2.1 Sitoutuminen

Fosforin immobilisoituminen maahiukkasten pinnoille on riippuvainen mm. sen pitoisuudesta maanesteessä. Liukoinen fosfori puolestaan on dynaamisessa tasapainossa maahan adsorptoituneen fosforin kanssa. Tasapainoa kuvaavat esim. Langmuirin tai Freundlichin isotermit, joista edellinen kuvaa vain yhden adsorptiokerroksen muodostumista hiukkasten pinnoille, mutta siitä huolimatta se on riittävän tarkka fosforin sitoutumismäärien arvioimisessa. Langmuirin isotermi voidaan esittää seuraavasti (Novotny & Chesters 1981):

$$S_e = (Q^o / b C_e)(1 + b C_e)^{-1} \quad (20)$$

$S_e$  = kiintoaineen adsorptioima fosforimäärä [ $\mu\text{g/g}$ ]

$Q^o$  = suurin adsorptiomäärä vakioämpötilassa [ $\mu\text{g/g}$ ]

$b$  = energiavakio [ $1/\text{mg}$  tai  $\text{ml}/\mu\text{g}$ ]

$C_e$  = tasapainotilan fosforipitoisuus maanesteessä vakioämpötilassa [ $\text{mg/l}$ ]

Freundlichin isotermi on muotoa:

$$S_e = K C_e^{1/n} \quad (21)$$

$K$  ja  $n$  ovat vakioita.

Ryden et al. (1972) esittävät maksimaalisen adsorption ( $Q^o$ ) ja energiakertoimen ( $b$ ) laskemiseksi seuraavanlaisia kaavoja:



$$Q^o = -3.5 + 10.7Sa + 49.5Co \quad [\mu\text{g/g}] \quad (22)$$

$$b = 0.061 + 169832 \times 10^{-\text{pH}} + 0.027Sa + 0.76Co \quad [\text{l/mg}] \quad (23)$$

$Sa$  on maa-aineksen savipitoisuus ja  $Co$  sen org. hiilipitoisuus (%).

Yhtälöt soveltuvat käytettäväksi vain happamalle maaperälle, emäksisillä mailla liukoisen ja partikkeleiden pinnalle sitoutuneen fosforin suhdetta säätelee fosforin liukoisuus.

Adsorption kulussa voidaan erottaa kaksi vaihetta : ensivaiheessa tapahtuu muutamasta minuutista pariin tuntiin kestävä nopea sitoutuminen, jota seuraa jopa viikkoja kestävä hitaan adsorption vaihe. Prosessin etenemistä voidaan kuvata seuraavasti:

$$dS/dt = K ( S_e - S ) \quad (24)$$

$K$  = adsorptiokerroin

$S$  = maahan adsorptoituneen fosforin määrä

$S_e$  = tasapainotilan konsentraatio

Ryden et al. (1972) arvioivat  $K$  :n suuruudeksi 0.12 1/h ja Enfieldin (1974) tekemät kokeet tukevat tätä tulosta.

### 6.2.2 Kulkeutuminen

Valumaveden fosforipitoisuus on suurempi peltomaan pitoisuuteen verrattuna, koska fosforia rikastuu pintamaasta valumaveteen desorption kautta ja pintavalunta irroittaa maasta eniten kevyttä orgaanista ainesta ja savesta, jotka sisältävät runsaasti fosforia (Mills et al.1985). Valumaveden kiintoaineksen fosforipitoisuus ( $Cs$ ) voidaan laskea seuraavasti :

$$Cs = ER Ci \quad (25)$$

$ER$  = rikastumiskerroin

$Ci$  = peltomaan fosforipitoisuus [mg/kg]

Kokeiden perusteella fosforin rikastumiskerroin on n. kaksinkertainen saveksen tai orgaanisen aineksen kertoimeen verrattuna (Novotny & Chesters 1981).

Fosforin rikastuminen on hyvin tapauskohtaista, koska se on aina sidoksissa eroosioon. Pienillä sademäärillä erodoituvat vain kaikkein kevyimmät partikkelit, jolloin  $ER$  -luku kasvaa suureksi. Rankkasateet vastaavasti irrottavat suuria maapartikkeleita ja  $ER$  -luku jää pieneksi. Menzelin (1980) kokeiden perusteella Mills et al. (1985) ehdottavat  $ER$  :n laskemiseksi seuraavanlaista kaavaa:

$$ER = 7.39(A)^{0.2} \quad (26)$$

missä  $A$  tarkoittaa valuntatapahtuman aikana syntyvää eroosiomäärää (kg/ha). Yhtälö ei sovellu vuotuisten arvojen laskemiseen, niissä tapauksissa suositellaan  $ER$  :n arvoksi 2.0. Jos yhden valunnan synnyttämä eroosio on yli 22t/ha, tulisi  $ER$  :n arvona käyttää 1.0.

Koko valuma-alueen kiintoainekseen sitoutuneen fosforin aiheuttama vuotuinen vesistökuormitus voidaan laskea seuraavasti (Donigian et al. 1976; McElroy et al. 1976, ref. Mills et al. 1985) :

$$WLS = DR \sum_k Ls_k Pa_k = 0.001 DR \sum_k Cs_k A_k Pa_k \quad (27)$$

$WLS$  = koko alueelta purkautuva kiintoainekseen sitoutuneen fosforin määrä vuodessa [kg/a]

$Ls_k$  = pelloilta k purkautuva kiintoainekseen sitoutunut fosfori [kg/ha]

$Pa_k$  = pellon k pinta-ala [ha]

$Cs_k$  = pelloilta k tulevan eroosioaineksen fosforipitoisuus (sitoutunut fosfori) [mg/kg]

$A_k$  = pelloilta k erodoituvaa maamäärää [t/ha]

Lyhyempien jaksojen fosforikuormitusta voidaan arvioida siten, että oletetaan fosforikuormituksen olevan riippuvainen alueelta purkautuvasta hienoainesmäärästä. Aikaisemmin esitetyn perusteella tiedetään, että kuukauden sedimenttikuorman  $Y_m$  :n suhde vuotuisen kuormaan  $Y$  on:

$$Y_m / Y = Q_m^{1.2} (QT)^{-1} \quad (28)$$

missä  $Q_m$  on valuma-alueen valunta (cm) kuukaudessa ja  $QT$  lasketaan yhtälöllä 17. Koska vuotuinen fosforikuorma saadaan yhtälöstä 27, voidaan kuukauden fosforikuorma laskea yhtälön 28 perusteella seuraavasti :

$$WLS_m = (Y_m / Y) WLS \quad (29)$$

Useilla valuma-alueilla hienoaineksen fosforipitoisuus on lähes tulkoon vakio, joten  $Cs_k$  on sama kaikille osa-alueille. Tällöin yhtälö (29) yksinkertaistuu :

$$\begin{aligned} WLS_m &= (Y_m / Y) 0.001 DR Cs \sum_k A_k Pa_k \\ &= (Y_m / Y) 0.001 Cs Y \\ &= 0.001 Cs Y_m \end{aligned} \quad (30)$$

Edellä esitetyt kaavat kuvaavat valuma-alueelta hienoaineksen mukana vesistöön päätyvän fosforin määrää. Niiden perusteella ei voida päätellä sitoutuneen fosforin rehevöittävää vaikutusta.

### 6.2.3 Liukoisen fosforikuorman laskeminen

Liukoisen fosforin kuormitusfunktio voidaan esittää seuraavasti (Mills et al. 1985):

$$LD = 0.1 Cd Q \quad (31)$$

$LD$  = pelloilta purkautuvan liukoisen fosforin määrä valumavedessä [kg/ha]

$Cd$  = liukoisen fosforin konsentraatio valumavedessä [mg/l]

$Q$  = valunta [cm]

Koko valuma-alueen synnyttämä liukoisen fosforin kuormitus voidaan esittää seuraavasti, kun oletetaan, että valumaveden fosforipitoisuus pysyy vakiona :

$$WLD = 0.1 \sum_k Cd_k Q_k Pa_k \quad (32)$$

$WLD$  = valuma-alueen synnyttämä liukoisen fosforin kuormitus [kg]

$Cd_k$  = liukoisen fosforin pitoisuus osa-alueen  $k$  valumavedessä [mg/l]

$Q_k$  = osa-alueen  $k$  valunta [cm]

$Pa_k$  = osa-alueen pinta-ala [ha]

Peltojen synnyttämä kokonaisfosforikuormitus voidaan laskea summaamalla vesistöön päätyneen kiintoainekseen sitoutuneen ja liukoisen fosforin määrät (kaavat 27 tai 30 ja 32).

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Suomi kuuluu ilmastonsa puolesta alueeseen, jossa eroosio ei ole ollut maanviljelyksen ongelma. Tästä syystä eroosiotutkimusta ei ole pidetty tarpeellisena. Vasta kasvanut huoli fosforikuormituksesta on kääntänyt huomion myös eroosioon. Kiistatta on todistettu, että suurin osa vesistöihin päätyvästä fosforista kulkeutuu sinne eroosioainekseen sitoutuneena.

Kevät- ja syysvalunta aiheuttavat suurimman osan vuotuisesta eroosiosta maassamme. Toimenpiteet, joilla vähennetään eroosiota, vähentävät myös fosforikuormitusta. Paras keino kuormituksen vähentämiseksi on ennaltaehkäisy, ts. luodaan pellolle sellaiset olosuhteet, jossa eroosiota ei synny. Toimiva salaojitus pienentää pintavaluntaa ja sitä kautta eroosiota. Salaojien kautta ei ole todettu huuhtoutuvan merkittäviä määriä maa-ainesta eikä fosforia. Avo-ojat ovat salaojiin verrattuna huonompi kuivatustapa, koska osa niihin päätyvästä valunnasta kulkeutuu pinnan kautta synnyttäen eroosiota. Lisäksi itse ojissa syntyy uomaeroosiota. Tämän osuus peltoalueen kokonaiskuormasta tulisi selvittää. Välillisesti tehokas kuivatus vähentää eroosiota tehostamalla kasvien kasvua. Toisaalta viljelykasvien vaikutus vuotuisen eroosioon on Suomen oloissa pieni, koska kasvukaudella maata kuluttavat voimat ovat heikkoja. Jos pellon pinta olisi kasvillisuuden peitossa kevät- ja syysvaluntojen aikana, eroosiota voitaisiin pienentää kaikilla niillä toimenpiteillä, jotka parantavat kasvien kasvua.

Pellon kaltevuuden ja pituuden kasvu lisäävät pintavalunnan määrää ja nopeutta. Eroosion vaivaamissa maissa kaltevuutta ja pituutta säädellään terasseilla. Suomessa niitä ei tarvita, koska pintavalunnan eteneminen voidaan katkaista mm. sorastetulla salaojalla. Kriittisen kaltevuuden ja pituuden arvoja ei maassamme ole selvitetty. Tulevaisuudessa ne pitäisi selvittää maalajeittain, jotta mahdollisten kuormitusta pienentävien toimenpiteiden tarpeellisuus voitaisiin helposti todeta.

Luonnontilassa olevan maan rakenne pysyy hyvänä tasapainossa olevan aineiden kierron, maaeläinten toiminnan, juuriston ja roudan ansiosta. Tehokkaasti viljellystä peltomaasta orgaaninen aines ja ravinteet vähenevät, maa tiivistyy eivätkä sen eliöstö tai kasvien juuret pysty pitämään rakennetta kunnossa. Jos satotasoa yritetään ylläpitää huonorakenteisessa maassa lannoituksen avulla, kuormitus kasvaa. Fosforilannoituksen jatkamisen tai lisäämisen sijasta maan ominaisuudet tulisi järjestää sellaiseksi, että kasvit pystyvät käyttämään hyväkseen maahan aikaisemmasta lannoituksesta varastoituneen fosforin.

Kalkituksen vaikutus fosforin käyttökelpoisuuteen vaihtelee maan ominaisuuksien mukaan. Maan pH:n noustessa kasvaa riski, että eroosion mukana vesistöön joutuvasta maa-aineksesta vapautuu fosforia veteen. Tämän vuoksi voimakasta kalkitusta tulee

välttää vesistöjen lähettyvillä, jos kalkitus lisää ko. maassa liukoisen fosforin määrää. Suojamuokkauksessa ja suorakylvössä maan rakennetta pyritään suojaamaan suosimalla luonnon omaa maanhoitoa. Tämä tapahtuu rikkomalla pellon pintaa mahdollisimman vähän tai jättämällä pinnalle korjuujäännöksiä. Molemmat menetelmät ovat osoittautuneet tehokkaiksi ja edullisiksi keinoiksi kuormituksen pienentämisessä. Suomessa niiden käyttöä ei ole pidetty tarpeellisena eikä niiden soveltuvuutta sen vuoksi ole perusteellisesti tutkittu. Todennäköisesti pellon pinnalla olevat kasvinjäännökset viivästyttävät kylvötoita ja lyhentävät siten muutenkin lyhyttä kasvukautta. Lisäksi jäännösten toistuva sulaminen ja jäätyminen vapauttaa suuren määrän fosforia. Ongelmistaan huolimatta suojamuokkauksen ja suorakylvön periaatteita tulisi ennakkoluulottomasti kehittää maahamme soveltuviksi.

Suomessa viljelyn aiheuttaman sedimentti- ja fosforikuormituksen pienentäminen onnistuu nykyisillä muokkaus- ja lannoitusmenetelmillä helpoimmin, kun muokkaus- suunta muutetaan korkeuskäyrien suuntaiseksi ja lannoite peitetään maan sisään. Suomessa käytettävä sijoituslannoitus vähentää fosforin käyttökelpoisuutta. Tästä syystä fosfori tulisi sijoittaa maahan muista lannoitteista erikseen. Kyntösuunnan muuttaminen on USAssa suoritetuissa kokeissa pienentänyt kuormituksen olemattomaksi. Tämä johtuu siitä, että pellon pinnalle tuleva vesi varastoituu ja patoutuu vakoihin eikä synnytä valuntaa. Mikäli varastotila täyttyy, alkaa eroosio. Tästä syystä pellon kuivatuksen tulee olla kunnossa.

Fosforikuormituksen vähentämiseksi on tärkeintä estää kaikkein pienimpien maapartikkelien päätyminen vesistöön, koska fosfori rikastuu juuri hienoimpaan ainekseen. Koska tällaisen aineksen laskeutumisenopeus seisovassakin vedessä on useita vuorokausia, ei vesistön ja pellon välillä oleva suojavyöhyke pysty pienentämään kuormitusta ainakaan sedimentoimalla hienoainesta.

Erilaisten viljelymenetelmien ja tapojen kuormitusvaikutusten selvittämiseksi tulisi maassamme kehittää oma malli tai modifioida vertailun jälkeen parhaaksi katsottua ulkomaista mallia olosuhteisiimme sopivaksi. Hydrologian mallintaminen maassamme osataan, joten tehtäväksi jää vedenlaatukomponenttien luominen. Mallin kehittämistä varten tarvitaan koekenttä, jossa eri tekijöiden vaikutusta voidaan luotettavasti tutkia.

Kuormituksen vähentämistoimenpiteitä suunniteltaessa tulisi harkita, mihin voidaan ja mihin kannattaa vaikuttaa, eli onko saavutettava hyöty uhrauksiin nähden riittävä. Esimerkiksi erodoitunut hienoaines voi vesistön kannalta olla hyödyksi, jos se sitoo vapaata fosforia pois kierrosta. Absoluuttista asteikkoa kuormituksen haitallisuudesta ei ole ja luonnon oman kuormituksen erottaminen viljelyn aiheuttamasta kuormituksesta on mahdotonta. Maanviljelyssä tulisi pohtia, voidaanko lannoitemäärää tai keinotekoista

maan rakenteen muuttamista vähentää ilman, että satotaso laskisi haitallisen alas. Vaikka laskua tapahtuisikin, on otettava huomioon mahdollinen viljelykustannusten aleneminen.

Suurin osa tähän selvitykseen käytetyistä tutkimuksista on tehty USA:ssa. Olosuhteiden erilaisuuden takia tulosten soveltamisessa Suomeen tulee olla kriittinen. Esimerkiksi kenttäkokeissa yleisesti käytettävä sateen intensiteetti 63.5 mm/h esiintyy Suomessa harvoin. Lisäksi eri tutkimustulosten keskinäinen vertailu on hankalaa, koska koeolosuhteet, tutkimustavat ja tavoitteet poikkeavat toisistaan. Ainoastaan Suomessa tunnetuissa olosuhteissa tehdyistä mittauksista riittävän pitkältä ajalta voidaan tehdä luotettavia päätelmiä eroosiosta ja fosforikuormituksesta.

## LÄHDELUETTELO

- Anon. 1988. Kemiran tilastoja.
- Airaksinen, J. U. 1978. Maa- ja pohjavesihydrologia. Oulu, Kustannusyhtiö Pohjoinen . 248 s.
- Allmarans, R. R., Unger, P. W. & Wilkins, D. W. 1985. Conservation Tillage Systems and Soil Productivity. In: Follet, R. F. & Stewart, B. A. (toim.) Soil Erosion and Crop Productivity. USA. S. 357-412.
- Andraski, B. J., Daniel, T. C., Lowery, B. & Mucller, D. H. 1985. Runoff Results from Natural and Simulated Rainfall for four Tillage Systems. Transactions of the ASAE, 28, 4. s. 1219-1225.
- Baker, J. L. & Laflen, J. M. 1983. Runoff Losses of Nutrients and Soil from Ground Fall-Fertilized after Soybean Harvest. Transactions of the ASAE, 26, 4, s. 1122-1127.
- Bengtson, R. L., Carter, C. E., Morris, H. F. & Bartkiewicz, S. A. 1986. Improving Surface Water Quality with Subsurface Drainage. Proceedings of International Seminar on Land Drainage, 9-11.7.1986. Otaniemi, TKK. S. 356-365.
- Bengtson, R. L., Carter, C. E., Morris, H. F. & Kowaleczuk, J. G. 1984. Reducing Water Pollution with Subsurface Drainage. Transactions of the ASAE, 27, 1, s. 1219-1225.
- Bennett, H. H. 1955. Elements of Soil Conservation. McGraw-Hill Book Company, Inc. USA. 358 s.
- Bennett, J. P. 1974. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. Water Resources Research, 10, 3, s.485-492.
- Bottcher, A. B., Monke, E. J. & Huggins, L. F. 1981. Nutrient and Sediment Loadings from a Subsurface Drainage System. Transactions of the ASAE, 24, 5, s. 1221-1226.
- Brink, N. 1984. Faktorer som påverkar växtnäringsförluster i åkermark. Jordbrukets förorening av vattenmiljön. Jordbrukets förorening av vattenmiljön. Tjugonde nordiska symposiet om vattenforskning, 8.-10.5.1984. Helsingfors, Nordforsk, miljövårdsserien, publikation 1984:2. S. 79-88
- Brink, N., Gustafson, A. & Persson, G. 1979. Förluster av kväve, fosfor och kalium från åker. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning för vattenvård. Ekohydrologi 4. S. 7-57.
- Brink, N., Gustavsson, A. & Ulén, B. 1984. Växtnäringsförluster runt Ringsjön. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning för vattenvård. Ekohydrologi 15. S. 3-12.
- Deizman, M. M., Mostaghimini, S., Shanholtz, V. O. & Mitchell, J. K. 1987. Size Distribution of Eroded Sediment from Two Tillage Systems. Transactions of the ASAE, 30, 6, s. 1642-1647.
- Dickey, E. C., Fennster, C. R., Laflen, J. M. & Mickelson, R. H., 1983. Effects of Tillage on Soil Erosion in a Wheat- Fallow Rotation. Transactions of the ASAE, 26, 3, s. 814-820.

- Dickey, E. C., Shelton, D. P., Jasa, P. J. & Peterson, T. R. 1984. Tillage, Residue and Erosion on Moderately Sloping Soils. Transactions of the ASAE, 27, 4, s.1093-1199.
- Dickey, E. C., Shelton, D. P., Jasa, P. J. & Peterson, T. R. 1985. Soil Erosion from tillage Systems Used in Soybean and Corn Residues. Transactions of the ASAE, 28, 4, s. 1124-1129.
- Edwards, W. M. & Larson, W. D. 1969. Infiltration of water into soils as influenced by surface seal development. Transactions of the ASAE, 12, s. 463-465, 470.
- Enfield, G. G. 1974. Rate of phosphorus sorption by five Oklahoma soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 38, s.404.
- FAO. 1978. Soil Erosion by Water. Some measures for its control on cultivated lands. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 284 s.
- Follet, R. F. & Stewart, B. A. (editors). 1985. Soil Erosion and Crop Productivity. ASA, CSSA, SSSA. USA. 533 s.
- Foster, G. R., Meyer, L. D. & Onstad, C. A. 1977. An erosion equation devised from basic erosion principles. Transactions of the ASAE, 20, s. 678 - 682.
- Foster, G. R. 1982. Modeling the Erosion Process. In: Haan C. T., Johnson, H. P. & Brakensiek, D. L. 1982. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. American Society of Agricultural Engineers, USA. S. 297 - 380.
- Foster, G. R., Young R. A., Römken, M. J. M. & Onstad, C. A. 1985. Processes of Soil Erosion by Water. In: Follet, R. F. & Stewart, B. A. (toim.) Soil Erosion and Crop Productivity. USA. S. 137-162.
- Foth, H. D. 1984. Fundamentals of Soil Science. John Wiley & Sons, USA. 435 s.
- Free, G. & Bay, C. E. 1969. Tillage and Slope Effects on Runoff and Erosion. Transactions of the ASAE, 12, 2, s. 209-211.
- Frere, M. H., Seely, E. H. & Leonard, R. A. 1982. Modeling the Quality of Water from Agricultural Land. In Haan, C. T., Johnson, H. P. & Brakensiek, D. L. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. American Society of Agricultural Engineers, USA. S. 383-405.
- Gilley, J. E., Finkner, S. C. & Varvel, G. E. 1987. Slope Length and Surface Residue Influences on Runoff and Erosion. Transactions of the ASAE, 30, 1, s.148 -151.
- Gustafson, A. 1982. Växtnäringsförluster från åkermark i Sverige. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning för vattenvård. Ekohydrologi 11. S. 19-27.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1984a. Växtnäringsförluster från åker i Nybroåns avrinningsområde. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning för vattenvård. Ekohydrologi 15. S. 21-26.



- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1984b. Växtnäringsförluster i Offer. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning för vattenvård. Ekohydrologi 15. S.39-51.
- Gustafson, A. & Torstensson, G. 1984c. Växtnäringsförluster i Vagle. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning för vattenvård. Ekohydrologi 15. S.27-38.
- Hamlett, J. M., Baker, J. L., Kimes, S. C. & Johnson, H. P. 1984. Runoff and Sediment Transport Within and from Small Agricultural Watersheds. Transactions of the ASAE, 27, 5. S. 1335-1363.
- Hartikainen, H. 1979. Phosphorus and Its Reactions in Terrestrial Soils and Lake Sediments. Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland, 51, s. 537-642.
- Hartikainen, H. 1981. Effect of Decreasing Acidity on the Extractability of Inorganic Soil Phosphorus. Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland, 53, s. 16-26.
- Hartikainen, H. 1983a. Effect of Liming on Phosphorus in Two Soils of Different Organic Matter Content. 1. Changes of Native and Applied Phosphorus in Incubation Experiment. Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland, 55, s. 345-354.
- Hartikainen, H. 1983b. Effect of Liming on Phosphorus in Two Soils of Different Organic Matter Content. 2. Changes in the Availability of Phosphorus to Turnip Rape. Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland, 55, s. 355-362.
- Hartikainen, H. 1984. Suomen maaperässä niukasti fosforia. Leipä leveämmäksi, 32, 6, s. 6-7.
- Haynes, R. J. 1982. Effects of Liming on Phosphate Availability in Acid Soils. Plant and Soil, 68, s. 289-308.
- Hyvärinen, V. 1986. Valunta. In: Mustonen, S. (toim.) Sovellettu hydrologia. Helsinki, Vesiyhdistys r. y. S. 152-160.
- Jasa, P. J., Dickey, E. C. & Shelton, D. P. 1986. Soil Erosion from Tillage and Planting Systems Used in Soybean Residue: Part 2. Influences of Row Direction. Transactions of the ASAE, 29, 3, s. 761-766.
- Jennings, G. D. & Jarret, A. R. 1985. Laboratory Evaluation of Mulches in Reducing Erosion. Transactions of the ASAE, 28, 3, s. 1466-1470.
- Joelsson, A. 1981. Ytavspolning av fosfor från åkermark. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning för vattenvård. Ekohydrologi 8. S. 23-30.
- Johnson, H. P., Baker, J. L., Shrader, W. P. & Laflen, J. M. 1979. Tillage System Effects on Sediment and Nutrients in Runoff from Small Watersheds. Transactions of the ASAE, 22, 5, s.1110-1114.
- Karvonen, T., Lemmelä, R. & Sucksdorff, Y. 1986. Infiltration into a Seasonally Frozen Soil and Modelling of Soil Freezing and Thawing Phenomena. Proceedings of International Seminar on Land Drainage, 9-11.7.1986. Otaniemi, TKK. S. 324-347.

- Kauppi, L. 1979. Phosphorus and nitrogen input from rural population, agriculture and forest fertilization to watercourses. *Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja*, 34, 12 s.
- Kauppi, L. 1984. Contributing of agricultural loading to the deterioration of surface waters in Finland. *Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja*, 57, 11 s.
- Kivisaari S. 1979. Effect of moisture and freezing on some physical properties of clay soils from plough layer. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland*, 51, 4, s. 245-326.
- Knisel, W.G (edit.) 1980. A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. U. S. Department of Agriculture, Conservation Research Report no. 26, 640 s.
- Kuusisto, E. 1980. On the intensity of rainfall in Finland. *Aqua Fennica*, 10, 3-11.
- Kuusisto, E. 1986. Sadanta. In: *Sovellettu hydrologia*. Helsinki, Vesiyhdistys r. y. S. 29-46.
- Kähäri, J., Mäntylahti, V. & Rannikko, M. 1987. Suomen peltojen viljavuus 1981-1985. Helsinki, Viljavuuspalvelu Oy. 105 s.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A. & Paulhaus, J. L. 1975. *Hydrology for Engineers*. McGraw - Hill, Kogakusha. Tokyo. 482 s.
- Mansikkaniemi, H. 1982. Soil erosion in areas of intensive cultivation in southwestern Finland. *Fennia* 160, 2, s. 225 - 276.
- Marshall, T. J. & Holmes, J. W. 1981. *Soil physics*. Cambridge University Press. England. 345 s.
- McHenry, J. R. & Bubenzer, G.D. 1985. Field Erosion Estimated from  $^{137}\text{Cs}$  Activity Measurements. *Transactions of the ASAE* 28, 2, s. 480-483.
- Mills, W. B., Porcella, D. B., Unga, M. J., Gherinini, S. A., Summers, S. A., Lingfung Mok, Rupp, G. L. Bowie, G. L. & Haith, D. A. 1985. *Water Quality Assessment: Part 1. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia*. S. 142 - 245.
- Mukhtar, S., Baker, J. L., Horton, R. & Erbach, D. C., 1985. Soil Water Infiltration as Affected by Use of the Paraplow. *Transactions of the ASAE* 28, 6, s. 1811-1816.
- Mussaari, I. 1974. Maatalous ja sen vaikutus vesistöjen kuormittajana Lounais-Suomessa. *Vesihallituksen tiedotus* 79. 232 s.
- Mutchler, C. K. & Murphree, C. E., Jr. Tillage Effects on Erosion and Sediment Sizes. *Transactions of the ASAE* 31, 2, s, 402-407.
- Novotny, V. & Chesters, G. 1981. *Handbook of nonpoint pollution*. Van Nostrand Reinhold Company, USA. 555 s.
- Pekkarinen, M. 1979. Ravinteiden huuhtoutuminen Siuntionjoen vesistöalueella. *Diplomityö teknillisessä korkeakoulussa*. 225 s.
- Pellervo. 1988. *Tilastot. Iso Kalenteri 1988*, 72, 18B.

- Rekolainen, S. & Kauppi, L. 1988. Assessment of the Finnish Agriculture 2000 Program: Effects of Nutrient Losses. Ecologically Sustainable Development of the Biosphere. Austria, IIASA, 81, 24 s.
- Ryden, J. C., Syers, J. K. & Harris, R. F. 1972. Potential of an eroding urban soil for the phosphorus enrichment of streams. *Journal of Environmental Quality*, 1, s. 430.
- Salo, P., Valta, K. & Mansikkaniemi, H. 1985. Lapväärtinjoen ja Hyyppäänjoen valuma-alueiden eroosiotutkimus. *Vesihallituksen tiedotus* 267. 76 s.
- Schwab, O. G., Fausey, N. R. & Kopcak, D. E. 1980. Sediment and Chemical Content of Agricultural Drainage Water. *Transactions of the ASAE* 23, 6, s. 1446-1449.
- Schwab, O. G., Frevert, R. K., Edminster, T. W. & Barnes, K. K. 1981. *Soil and Water Conservation Engineering*. John Wiley & Sons, USA. 525 s.
- Seppänen, H. 1987. Hajakuormitus. Turvetuotannon ja maatalouden vesistöhaitat ja niiden vähentäminen. Oulun vesistötutkimuspäivät 7.-8.4.1987. *Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja*, 22, s. 3 - 10.
- Seuna, P. & Kauppi, L. 1981. Influence of sub-drainage on water quantity and quality in cultivated area in Finland. *Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja*, 43, 16 s.
- Skaggs, R. W. & Khaleel, R. 1982. Infiltration. In: Haan C. T., Johnsson, H. P. & Brakensiek, D. L. 1982. *Hydrologic modeling of small watersheds*. American Society of Agricultural Engineers, USA. S. 121-166.
- Soveri, J. 1986. Routa ja routiminen. In: *Sovellettu hydrologia*. Helsinki, Vesiyhdistys r.y. Helsinki. S. 94 - 98.
- Tisdale, S. L. & Nelson, W. L. 1975. *Soil Fertility and Fertilizers*. Macmillan Publishing Co., Inc., New York. 694 s.
- Ulén, B. 1982. Erosion an fosfor från åker. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning för vattenvård. *Ekohydrologi* 11. S. 29-39.
- Ulén, B. 1984. Nitrogen and Phosphorus to Surface Water from Crop Residues. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning från vattenvård. *Ekohydrologi* 18. S. 39-44.
- Ulén, B. 1985. Åkermarkens Erosion. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet. Avdelning från vattenvård. *Ekohydrologi* 20. S. 26-35
- Vakkilainen, P. 1986. Haihdunta ja maavedet. In: *Sovellettu hydrologia*. Helsinki, Vesiyhdistys r. y. S. 64 - 94.
- Ward, R. C. 1967. *Principles of Hydrology*. McGraw-Hill Publishing Company Ltd. Great Britain. 403 s.
- White, R. E. 1979. *Introduction to the Principles and Practice of Soil Science*. Blackwell Scientific Publications. Great Britain. 198 s.
- Zachar, D. 1982. *Soil Erosion*. Elsevier Scientific Publishing Company. Tšekkoslovakia. 547 s.

