

# VESIHALLITUKSEN MONISTESARJA

ROUTA JA ROUTIMINEN  
Peruskäsitteet  
1981:94  
Routimismekanismi  
MOREENIMAAPATOJEN ROUTAANTUMINEN  
2.31 ROUTA JA ROUTIMINEN  
2.32 ROUTA  
Juha Susimaa  
2.321 Pohjarakennusohjeet  
2.322 Beskow'in kriteeri  
2.323 Unified Soil Classification



V E S I H A L L I T U K S E N M O N I S T E S A R J A

1981:94

MOREENIMAAPATOJEN ROUTAANTUMINEN  
JA ROUTIMINEN

Juha Susimaa

Vesihallitus  
Helsinki 1981



M O R E E N I M A A P A T O J E N   R O U T A A N T U -  
M I N E N   J A   R O U T I M I N E N

SISÄLLYSLUETTELO

sivu

1.	JOHDANTO	1
2.	ROUTA JA ROUTIMINEN	2
2.1	Peruskäsitteet	2
2.2	Routimismekanismi	2
2.3	Routivuusluokitus ja routivuuskriteerit	3
2.31	Routivuusluokitus	3
2.32	Routivuuskriteerit	4
	2.321 Pohjarakennusohjeet	4
	2.322 Beskow'in kriteeri	5
	2.323 Unified Soil Classification System'in routivuuskriteeri	6
	2.324 Routimisen nopeuteen perustuvat kriteerit	7
2.33	Olosuhteiden vaikutus routivuuteen	8
2.4	Routaantumiseen vaikuttavat tekijät	9
2.41	Ilmasto	9
	2.411 Pakkasmäärä ja vuoden keski- lämpötila	10
	2.412 Lumi	14
2.42	Maalajien lämpötekniset ominaisuudet	15
	2.421 Lämmönjohtavuus	15
	2.422 Ominaislämpö ja lämpökapasi- teetti	19
	2.423 Jäätymispiste	20
2.5	Roudan syvyyden laskentamenetelmät	21
2.51	Lämmön siirtyminen maassa	21
2.52	Neumann'in menetelmä	22
2.53	Ruckli'n menetelmä	25
2.54	Watzinger'in ja Beskow'in menetelmät	26
2.55	Janssonin menetelmä	31

2.56	Suomalaisia tutkimuksia	34
2.561	U. Soveri - S. Johansson	34
2.562	Mustosen tutkimus	36
3.	ROUTIMINEN MAAPADOISSA	37
3.1	Stabiliteetti	37
3.2	Eroosio	39
3.21	Sisäinen eroosio	39
3.22	Ulkoinen eroosio	42
4.	TUTKITTUJEN PATOJEN RAKENTEET	43
4.1	Liikapuron altaan maapato	43
4.2	Kivi- ja Levalammen altaan maapato	44
4.3	Hirvijärven altaan maapato	46
4.4	Kalajärven altaan maapato	47
4.5	Kyrkösjärven altaan maapato	49
4.6	Hautaperän altaan maapato	50
4.7	Uljuan altaan Tulisaaren maapato	52
5.	HAVAINNOT	54
5.1	Lämpötilat	54
5.2	Routaantumisanalyysi	57
5.21	Lumitiedot	57
5.22	Roudansyvyyshavainnot	57
5.221	Mittausväline	57
5.222	Talvikausi 1979-1980	58
5.223	Uljuan altaan Tulisaaren maapadon havainnot	66
5.224	Hautaperän altaan maapadon havainnot	70
5.23	Tilastollinen tarkastelu	74
5.24	Roudan syvyyden teoreettinen laskenta	77
5.241	Kosteuspitoisuusmääritykset	77
5.242	Roudan syvyyden laskeminen	82
5.25	Suotovedenpinnan mittaukset	86
5.3	Routimisanalyysi	89
5.31	Vedenläpäisevyyskokeet	89
5.311	Koemenetelmä	89

5.312 Tulosten tarkastelua	91
5.32 Löyhtymisen vaikutukset virtaus- verkostoon	94
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	97
6.1 Routaantuminen	97
6.2 Routiminen	99
6.3 Toimenpiteet Vaasan vesipiirin padoilla	100
6.4 Routimisen huomioiminen maapatojen suunnittelussa	100
7. YHTEENVETO	102

SUMMARY

KIRJALLISUUSLUETTELO

LIITTEET

## L I I T T E E T

1. Liikapuron altaan maapadon rakenne ja routamittarien sijoitus
2. Kivi- ja Levalammen altaan maapadon rakenne ja routamittarien sijoitus
3. Hirvijärven altaan maapadon rakenne ja routamittarien sijoitus
4. Kalajärven altaan maapadon rakenne ja routamittarien sijoitus
5. Kyrkösjärven altaan maapadon rakenne ja routamittarien sijoitus
6. Hautaperän altaan maapadon rakenne
7. Hautaperän altaan maapadon routamittarien sijoitus
8. Uljuan altaan Tulisaären maapadon rakenne
9. Kalajärven allas pl. 78+00. Vedenläpäisysuhteella  $k_x = k_y$  lasketut ekvipotentiaaliviivat
10. Kalajärven allas pl. 78+00. Vedenläpäisysuhteella  $k_x = k_y$  lasketut nopeusvektorit
11. Kalajärven allas pl. 78+00. Vedenläpäisysuhteella  $k_x = 9k_y$  lasketut ekvipotentiaaliviivat
12. Kalajärven allas pl. 78+00. Vedenläpäisysuhteella  $k_x = 9k_y$  lasketut nopeusvektorit

M E R K I N N Ä T

$C_u$	Raekokosuhde
$d$	Raekoko, mm
$I_P$	Plastisuusluku
$h_C$	Kapillaarisuus, m
$w_L$	Juoksuraja, %
$w_P$	Plastisuusraja, %
$F$	Ilman pakkasmäärä, $h^{\circ}C$
$F^*$	Maanpinnan pakkasmäärä, $h^{\circ}C$
$K_F$	Pakkasmäärän korjauskerroin
$\lambda$	Lämmönjohtavuus, $\frac{W}{mK}$
$S_r$	Kyllästysaste
$\rho$	Tiheys, $kN/m^3$
$w$	Vesipitoisuus
$n$	Huokoisuus
$c$	Ominaislämpö, $\frac{J}{kgK}$
$C$	Lämpökapasiteetti, $\frac{J}{m^3K}$
$i$	Veden jäätymislämpö, $93 \frac{Wh}{kg}$
$T$	Lämpötila, $^{\circ}C$
$\gamma$	Tilavuuspaino, $kN/m^3$
$\gamma_w$	Veden tilavuuspaino
$t$	Aika, s
$x$	Syvyys, m
$T_f$	Veden jäätymislämpötila, $0^{\circ}C$
$A$	Pinta-ala, $m^2$
$Q$	Lämpömäärä, kJ
$\xi$	Roudan syvyys, m
$T_s$	Maanpinnan lämpötila, $^{\circ}C$
$g$	Lämpötilagradientti, $^{\circ}C/m$
$q_n^*$	Tehollinen muutoslämpö
$s$	Leikkauslujuus, $\frac{kN}{m^2}$
$c$	Koheesio, $\frac{kN}{m^2}$
$c'$	Tehokas koheesio, $\frac{kN}{m^2}$
$\sigma$	Normaalijännitys, $\frac{kN}{m^2}$
$\sigma'$	Tehokas normaalijännitys, $\frac{kN}{m^2}$
$\phi$	Kitkakulma
$\phi'$	Tehokas kitkakulma

D	Tiiveysaste, % parannetulla Proctor-kokeella saavutetusta tilavuuspainosta
k	Vedenläpäisevyys, m/s
HW	Altaan korkein sallittu vedenpinta
L	Talven keskimääräisen lumipeitteen paksuus, cm
$\gamma_d$	Kuivatilavuuspaino, $\text{kN/m}^3$
$\Omega$	Routavastus, $h^\circ\text{C}$
u	Huokosvedenpaine

## 1. JOHDANTO

Routa on Suomen ilmasto-olosuhteissa merkittävä rakennusteknillinen tekijä. Maarakennustekniikan kehittyminen ja moreenimaalajien yleisyys ovat johtaneet moreenista rakennettujen maapatojen yleistymiseen vesirakennushankkeissa. Maapatojen kunnossapitotarkkailussa tehdyt havainnot moreenin routimisesta ovat aiheuttaneet tarpeen maapatojen suunnitteluperusteiden tarkistamiseen.

Tässä tutkimuksessa on pyritty selvittämään maapatojen routaantumista sekä routimisen vaikutusta patojen vedenläpäisevyyteen ja sisäisen eroosion syntymiseen. Lisäksi on kirjallisuustietoihin pohjautuen arvioitu routimisen vaikutusta maapatojen stabiliteettiin. Tutkimuksen teoreettisessa osassa on esitetty eri maissa käytettyjä routimiskriteerejä ja käyty läpi routaantumisen teoreettisia laskentamalleja. Edelleen on arvioitu eri ilmastollisten ja rakenteellisten tekijöiden vaikutusta routaantumiseen sekä näiden tekijöiden määrittäystä.

Tutkimuskohteina ovat talvella 1979-1980 olleet Kivi- ja Levalammen, Kalajärven, Hirvijärven, Liikapuron sekä Kyrkösjärven altaiden maapadot. Lisäksi on käsitelty roudansyvyys-havaintoja Hautaperän maapadosta vuosilta 1976-1978 sekä Uljuan altaan Tulisäaren maapadosta vuosilta 1970-1973.

Havaintojen perusteella on suoritettu analyysi em. rakenteiden routaantumisesta tilastollisten ja teoreettisten menetelmien avulla. Tutkimuksissa saatujen vedenläpäisy-tietojen pohjalta on pyritty luomaan kuva rakenteiden suotovirtaustilanteesta. Lopuksi on esitetty eräitä suunnitteluperusteita routimisen huomioimiseksi maapatojen suunnittelussa ja kunnossapidossa.

## 2. R O U T A J A R O U T I M I N E N

### 2.1 PERUSKÄSITTEET

Maan lämpötilan laskiessa jäätyislämpötilan alapuolelle alkaa maan huokosissa oleva vesi jäätyä eli maa routaantuu. Maan jäähtyminen tapahtuu maahan kesäkautena varastoituneen lämmön virratessa pakkaskautena ulkoilmaan. Routa on maassa olevan veden jäätyamisen johdosta kovettunutta maata /15/.

Routimiseksi kutsutaan sellaista maan routaantumista, jossa maakerroksen tilavuus kasvaa. Tilavuuden kasvu aiheutuu routakerrokseen imeytyvästä vedestä. Syntyvä tilavuuden kasvu tapahtuu suurimmaksi osaksi ylöspäin ilmeten maan pinnan kohoamisena eli nk. routanousuna. Routineen maan suolaessa maassa oleva ylimääräinen vesi muuttaa maan rakenteellisia ominaisuuksia aiheuttaen ns. routapehmenemisen.

### 2.2 ROUTIMISMEKANISMI

Veden erilaisilla sitoutumismuodoilla uskotaan olevan ratkaiseva merkitys routimistapahtumalle /20/. Sitoutumistavan perusteella voidaan maassa erottaa kapillaarivettä, adsorptiovetttä, huokoskulmavettä jne. Maarakeiden pinnalle syntyy molekyyllivoimien vaikutuksesta adsorptiovesivaippoja, joiden ominaisuudet poikkeavat vapaan veden ominaisuuksista. Adsorptiovesivaipat ovat sitä lujemmin sitoutuneita mitä lähempänä maahiukkasta ne ovat.

Jääkiteen kasvu alkaa huokosten keskiosista, jossa olevan veden jäätyispiste on korkein. Jääkiteen ja maarakeen välissä säilyvät em. adsorptiovesivaipat. Lämpötilan edelleen laskiessa alkavat myös vesivaippojen vesimolekyylit liittyä jääkiteeseen. Tällöin pyrkivät ohentuneet vesivaipat imemään itseensä sulasta maasta lisää vettä säilyttääkseen alkuperäisen paksuutensa. Fysikaalisesti ilmiön syynä on vesivaippojen ohentumisen aiheuttama termodynaamisen potentiaalin pieneneminen, mikä johtaa veden virtaamiseen pienenevän potentiaalin suuntaan /18/. Imeytyvä vesi asettuu

jääkiteiden ja maahiukkasten väliin suurentaen vesivaipan entiselleen. Lämpötilan edelleen laskiessa edellä kuvattu tapahtumaketju toistuu johtaen jääkiteen kasvuun, kunnes veden saanti jostain syystä lakkaa. Näin syntyy maahan suuriakin yhtenäisiä jääkerroksia ns. jäälinsejä, jotka aiheuttavat maassa tilavuuden kasvua.

## 2.3 ROUTIVUUSLUOKITUS JA ROUTIVUUSKRITTEERIT

### 2.31 R o u t i v u u s l u o k i t u s

Käytännössä rakentajia ei kiinnosta varsinaisesti routimismekanismi vaan tieto onko jonkin maalaji routivaa vai ei. Routimaton maa jäätyy homogeenisesti eikä siinä tapahdu veden imeytymistä jäätyvään kerrokseen. Routivissa maalajeissa tapahtuu edellisessä kappaleessa kuvattu routimistapahduma. Routimisen edellytyksenä on, että maalaji on routivaa, maan lämpötila alittaa jäätympisteen, ja että maassa on tai siihen voi kulkeutua kapillaarisesti vettä eikä maakerroksessa vaikuta routimispainetta suurempaa vastapainetta.

Eri maissa on pyritty kehittämään käytäntöä palvelevia routivuuskriteerejä. Routivuuden arvostelu tapahtuu pääasiansa seuraavien parametrien perusteella /23/:

Rakeisuus

$$\text{Raekokosuhde } C_u = d_{60}/d_{10}$$

$$\text{Plastisuusluku } I_p = w_L - w_P$$

Kapillaarisuus  $h_c$

Routivuus määritetään kuitenkin parhaiten routimiskokeessa. Kokeessa annetaan maanäytteen jäätyä yläpinnastaan alapinnan ollessa yhteydessä "pohjaveteen". Kokeen aikana määritetään routimismousun nopeus. Taulukossa 1 on esitetty eräiden maiden routivuusluokituksen perusteet.

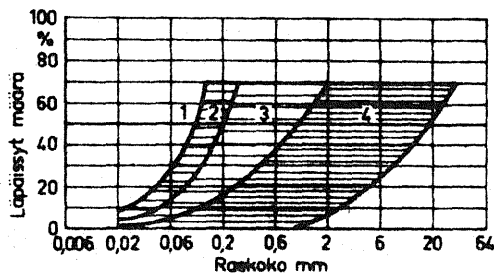
Taulukko 1. Eri maiden routivuusluokituksen perusteet /23/.

Maa	Rakeisuus	Raekoko- suhde $C_u$	Plastisuus- luku $I_P$	Kapillaa- risuus $h_c$	Jäädyttämiskoe laboratoriossa
Suomi	X			X	
Ruotsi	X			(X)	
Norja	X	X			
Sveitsi	X	X	X		X
USA	X	X	X		X

## 2.32 R o u t i v u u s k r i t e e r i t

## 2.321 Pohjarakennusohjeet

Pohjarakennusohjeiden /19/ mukaan maalajin routivuus määritetään rakeisuuskäyrän perusteella. Maalajin routivuusarvostelua varten on siis suoritettava seulontakoe ja lisäksi myös areometrianalyysi. Selvitetyn rakeisuuskäyrän muotoa vertaillaan kuvaan 1 /19/, jonka perusteella saadaan selville maalajin routivuus.



Kuva 1. Maalajien routivuuden arvostelu rakeisuuden perusteella. Maalajit, joiden rakeisuuskäyrä on alueella 1, ovat routivia. Maalaji, jonka rakeisuuskäyrä kulkee alueilla 2,3 tai 4, on routimaton, jos käyrän alapää pysyy ko. alueen ylimmäisen rajakäyrän alapuolella /19/.

Epäselvissä tapauksissa suoritetaan rakeisuusmäärityksen lisäksi iokc kapillaarisuus- tai routimiskoe. Maalaji, jonka kapillaarisuus on alle 1 metrin, katsotaan routimattomaksi.

### 2.322 Beskow'in kriteeri

Beskow on luonut kriteerinsä nimenomaan moreenimaalajien arvosteluun. Kriteeriä voidaan käyttää myös muiden maalajien arvosteluun. Arvostelun pohjana ovat rakeisuudet 0,062 mm ja 0,125 mm sekä maalajin kapillaarisuus. Taulukossa 2 on esitetty Beskow'in kriteeri.

Taulukko 2. Beskow'in routivuuskriteeri /2/.

Luokitus	Moreeni: $C_u > 20$ Sedimenttimaalaji; $C_u < 20$	50% läpäisyä vast.raekoko $d_{50}$ mm	alle 0,062 ja 0,125 mm rakeiden määrä painoprosentteina laskettuna 2 mm pienemmästä materiaalista 0.062 mm 0.125 mm	Kapillaarisuus $h_c$ m
Routimaton	Sedimentti Moreeni	0.1 -	< 30     < 55 < 15     < 22	1
Tietyissä olosuhteissa routiva kuten korkean pohjavedenpinnan ja hitaan routaantumisen valitessa	Sedimentti Moreeni	0.1-0.07 -	} 30-50     - } 15-25     22-36	} 1-1.75 } 1.25-2.50
	Sedimentti Moreeni	0.08-0.05 -		
Normaalisti routiva pohjavedenpinnan syvyydellä 1.5 m (moreeni 1.0m)	Sedimentti Moreeni	> 0.05	> 50     - > 25     36	} 2-n.20
Routiva savi	Sedimentti	-	-     -	n. 20
Routimaton savi	Sedimentti			

### 2.323 Unified Soil Classification System'in routivuuskriteeri

Casagrande /29/ kehitti 1940-luvulla tämän routivuuskriteerin. Routimattomina maalajeina kriteerissä pidetään maalajeja, joissa materiaalista on 0-3 painoprosenttia alle rae-koon 0,020 mm. Muu maa-aines on jaettu neljään eri ryhmään, F 1:stä F 4:ään, routivuutensa mukaan. Savaa, silttiä ja muita hienorakeisia lajittuneita maalajeja pidetään routivimpina. Taulukossa 3 on esitetty Unified Soil Classification System'in routivuuskriteeri /29/.

Taulukko 3. Unified Soil Classification System'in routivuuskriteeri /29/.

Luokitus		Maalaji	Painoprosenttia < 0,020 mm
Routimaton			0-3
Routimattomasta lievästi routivaan	F 1	Sora	3-20
Lievästi routiva	F 2	Hiekka	3-15
Routiva	F 3	Sora Hiekka lukuunottamatta hienoa silttistä hiekkaa Savi, $I_p > 12$	> 20
Erittäin routiva	F 4	Siltti ja hiekkainen siltti. Hieno silttinen hiekka Savi, $I_p < 12$ Lajittunut savi ja muut hienorakeiset lajittuneet kerrostumat	> 15

## 2.324 Routimisnousun nopeuteen perustuvat kriteerit

Laboratoriossa suoritettaviin routanousukokeisiin liittyen ovat eri tutkijat esittäneet routanousun nopeuteen perustuvat routivuusluokituksensa.

Taivainen /26/ on esittänyt taulukon 4 mukaisen luokituksen.

Taulukko 4. Taivaisen routivuuskriteeri /26/.

Routivuusluokitus	Routanousun nopeus [ mm/h ]
Routimaton maa	0-0,17
Lievästi routiva maa	0,17-0,50
Erittäin routiva maa	> 0,50

"U.S. Army, Corps of Engineers", on esittänyt taulukon 5 mukaisen routivuuskriteerijä /17/.

Taulukko 5. "U.S. Army, Corps of Engineers": routivuusluokitus /17/.

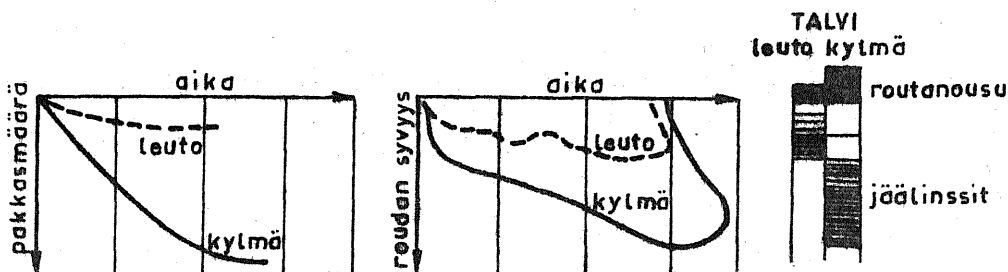
Routiminen	Routimisnousun nopeus [mm/h]
Merkityksetön	0,00-0,02
Hyvin pieni	0,02-0,04
Pieni	0,04-0,08
Kohtalainen	0,08-0,17
Suuri	0,17-0,33
Hyvin suuri	> 0,33

Edellä esitettyjä kriteereitä on käytetty pääasiassa teiden routivuustutkimuksiin, mutta ne soveltuvat myös maapatojen materiaalin routivuustutkimuksiin /17/. Kokeista saatua routanousun nopeutta arvioitaessa on huomioitava, että koe on pienoismallikoe. Tulokset muunnetaan luonnolliseen mittakaavaan esim. Fourier'in mallilain /21/ avulla.

### 2.33 Olosuhteiden vaikutus routivuuteen

Edellä esitetyt routivuuskriteerit perustuvat lähinnä maalajin rakeisuuteen, eivätkä ota riittävästi huomioon olosuhdetekijöitä. Maalajin routivuuteen vaikuttavia olosuhdetekijöitä ovat ilmaston aiheuttama "rasitus", "pohjaveden" korkeus, ja kuormitus.

Ilmastorasitus eli pakkasmäärän suuruus ja roudan etenemisnopeus vaikuttavat merkittävästi routimiseen. Pakkasmäärän ollessa pieni etenee routa hitaasti ja maahan ehtii muodostua paksuja jäälinsskejä, jotka johtavat suhteellisesti suuriin routimisnousuihin. Suurella pakkasmäärällä routa etenee nopeasti eikä maahan ehdi muodostua paksuja jäälinsskejä, joten routanousut jäävät suhteellisesti pienemmiksi (kuva 2). Patorakenteissa on ratkaisevaa jäälinssien synty suotovyöhykkeessä ja roudan aiheuttamien halkeamien ulottumissyvyys. Täten syvälle ulottuvien vaurioiden synty edellyttää ankaria ilmasto-olosuhteita.



Kuva 2. Pakkasmäärän, roudan etenemisen ja routanousun yhteys leutona ja kylmänä talvena /23/.

Suotoveden korkeustaso rakenteessa vaikuttaa jäälinssien veden saantiin. Korkea suotovesitaso johtaa usein paksujen jäälinssien syntyyn. Säännöstelyaltaiden patorakenteissa on suotoveden korkeustaso roudan syntymisaikaan tavallisesti alimmillaan, mutta useimmiten altaiden vedenpinnan vaihtelu on niin pientä, että veden kulkeutuminen routajalle on mahdollista.

Kuormitus pienentää jäälinssien syntyä ja suuren paineen alaisena jäälinssien muodostuminen estyy. Patorakenteissa tulee routivuustutkimuksessa ottaa huomioon maan painon vaikutus jäälinssien syntyyn suotovyöhykkeessä.

Patorakenteiden routivuustutkimuksessa on tavallisesti esim. routanousukokeiden suoritus käytännöllisistä syistä mahdollista. Täten olosuhdetekijöitä ei tarkemmin voida huomioida routivuusarvostelussa. Tällöin tarkastelu tulisi suorittaa "Pohjarakennusohjeiden" /19/ mukaan lisättynä kapillaarisuuden arvostelulla.

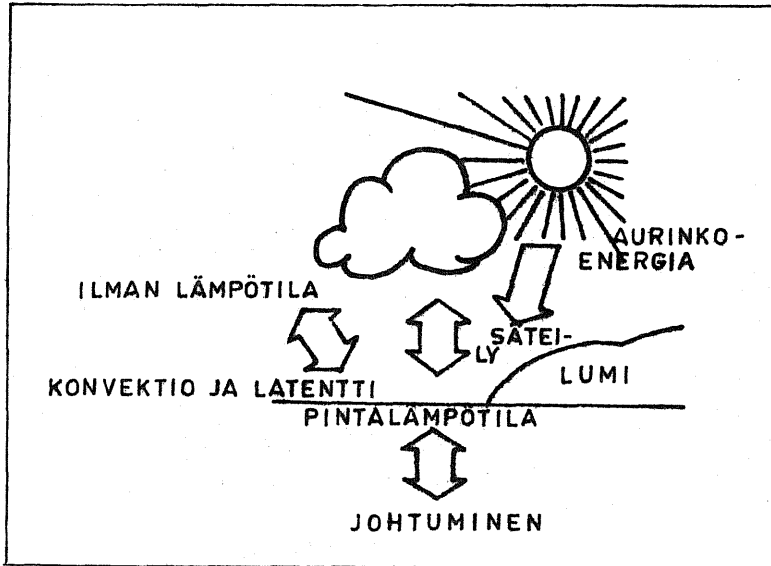
## 2.4 ROUTAANTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

### 2.41 I l m a s t o

Roudan syvyys riippuu maanpinnan lämpötilasta. Maanpinnan lämpötila seuraa aurinkoenergian määrän ja ilman kanssa tapahtuvan lämmönvaihtelun muutoksia, eikä se ole koskaan vakiotilassa. Lämpötilan vaihtelu tapahtuu lyhyesti seuraavalla tavalla /23/:

- Aurinkoenergian absorpoinnin avulla. Intensiteetti riippuu tulokulmasta, pilvisyydestä sekä maanpinnan rajavastuksesta.
- Säteilyn lämpötilan vaihteluna ilmakehän vesipitoisuuden, pilvisyyden ja epäpuhtauksien vaikutuksesta.
- Konvektiivisenä lämmönsiirtymisenä lähimmän lämpötilan vaihteluja seuraavan ilmakerroksen kanssa.
- Lumipeite toimii eristeenä maanpinnan säteilyn ja konvektion aiheuttamaa suoraa lämmönvaihtelua vastaan.
- Lämmönjohtumisena maanpinnassa:
- Lumen sulamisena.

Kuvassa 3 /23/ on esitetty ne tekijät, jotka vaikuttavat maanpinnan lämpötilaan.



Kuva 3. Lämmönvaihtelu maanpinnassa /23/.

Käytännön tarkasteluissa ei kaikkia edellä mainittuja tekijöitä voida ottaa huomioon. Tärkeimmät roudan syvyyteen vaikuttavat ilmastolliset tekijät ovat pakkaskauden ilman lämpötila, pakkaskauden pituus, vuoden keskilämpötila ja lumikerroksen paksuus.

#### 2.411 Pakkasmäärä ja vuoden keskilämpötila

Tärkein maan routaantumiseen vaikuttava tekijä on ilman lämpötila. Talven ankaruutta kuvaavana tekijänä on käytetty käsitettä pakkasmäärä.

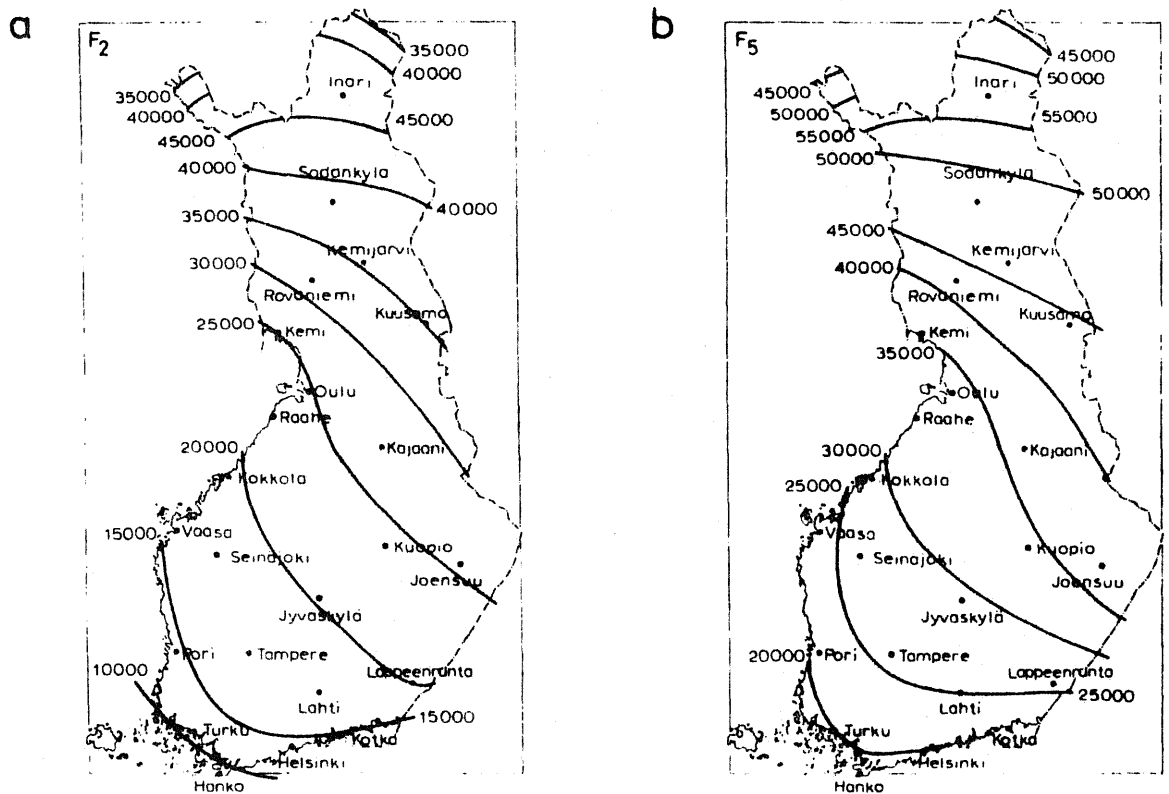
Pakkasmäärä määritellään talven aikaisen negatiivisen lämpötilan aikaintegraaliksi. Käytännön laskelmia varten voidaan pakkasmäärä laskea pakkaskauden lämpötilojen kuukausikeskiarvojen summan ja keskimääräisen kuukauden tuntimäärän tulona kaavan (1) mukaan /23/:

$$F = 730 \cdot \sum |T_{\text{kuukausi}}|, [\text{h}^\circ\text{C}] \quad (1)$$

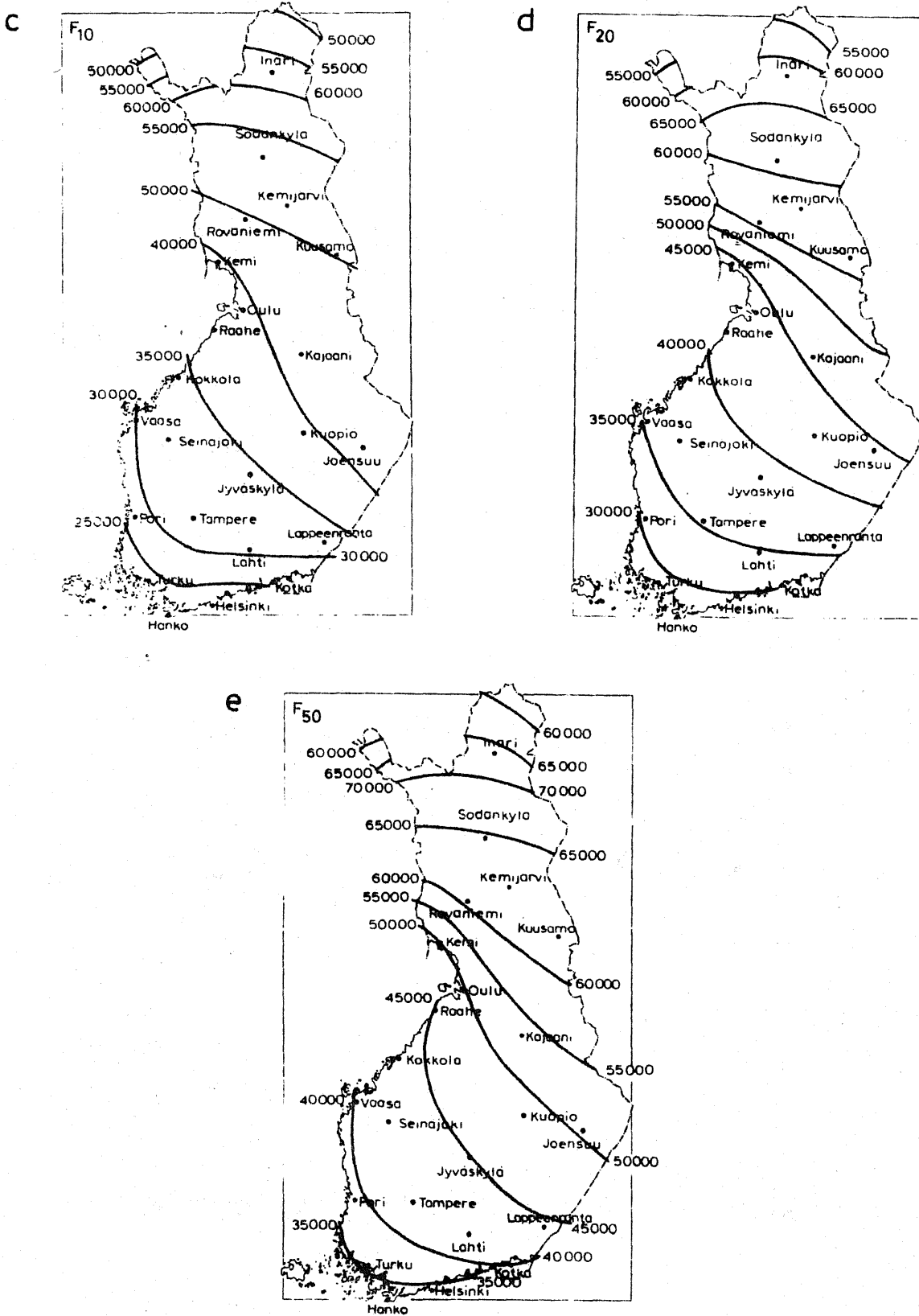
$T_{\text{kuukausi}}$  on kuukauden keskilämpötila

Laskettaessa pakkasmäärä kuukausikeskiarvojen perusteella eivät lyhyet väliaikaiset kylmäjaksot syksyllä ja keväällä lisää pakkasmäärää.

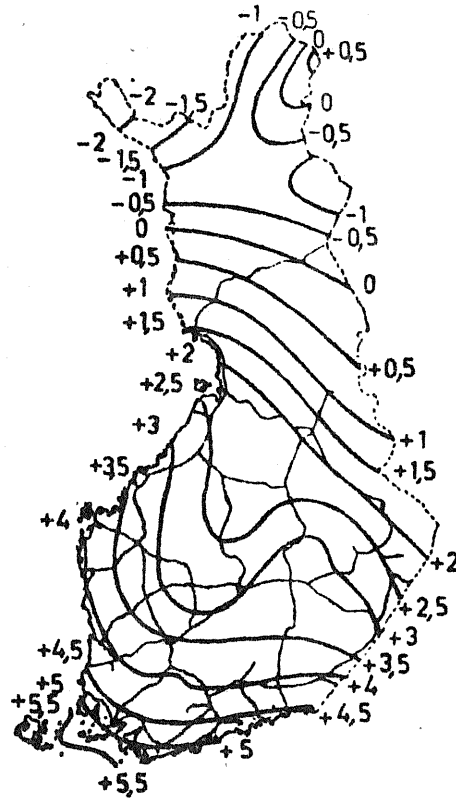
Routasuojauksen mitoittamista varten on kuvissa 4 a-e /15/ esitetty tietyillä todennäköisyyksillä esiintyvät pakkasmäärät. Kuvissa esitetyt pakkasmäärät on laskettu kuukausikeskiarvojen perusteella.



Kuva 4. a) Kerran 2 vuodessa toistuva pakkasmäärä  $F$ ,  $\text{h}^\circ\text{C} / 15/$ .  
b) Kerran 5 vuodessa toistuva pakkasmäärä  $F$ ,  $\text{h}^\circ\text{C} / 15/$ .



Kuva 4. c) Kerran 10 vuodessa toistuva pakkasmäärä  $F$ ,  $h^{\circ}C / 15/$ .  
 d) Kerran 20 vuodessa toistuva pakkasmäärä  $F$ ,  $h^{\circ}C / 15/$ .  
 e) Kerran 50 vuodessa toistuva pakkasmäärä  $F$ ,  $h^{\circ}C / 15/$ .



Kuva 5. Vuoden keskilämpötila kaudella 1931-60 /9/.

Routasuojauksista mitoitettaessa valitaan suunnittelussa käytettävä pakkasmäärä huomioiden mikroilmaston vaikutus, routasuojattava kohde sekä rakenteen vaurioitumisherkkyys. Roudan aiheuttamat vakavat vahingot maapadoille ovat harvinaisia, joten maksimipakkasmäärien käyttö routasuojauksen mitoituksessa on liioiteltua. Mitoittavana pakkasmääränä on käytetty kerran 10 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää /17/. Esiitettyjen pakkasmääräkäyrien välit voidaan interpoloida suoraviivaisesti.

Janssonin /5/ mukaan maan lämpövarastolla on huomattava vaikutus roudan syvyyteen. Lämpövaraston merkitys huomioidaan vuoden keskilämpötilan avulla. Kuvassa 5 /9/ on esitetty vuoden keskilämpötila kaudella 1931-60.

## 2.412 Lumi

Lumi vaikuttaa roudan kehittymiseen toimien lämmöneristeenä huonon lämmönjohtokykynsä takia. Lumen lämmönjohtokyky riippuu lumikiteiden rakenteesta ja lumen tiheydestä. Lumen tiheys vaihtelee maan eri osissa ollen suurimmillaan Etelä- ja Lounais-Suomessa. Edelleen lopputalvesta lumen tiheys kasvaa pienentäen lumipeitteen eristysvaikutusta.

Lumipeitteen vaikutus roudan syvyyteen voidaan norjalaisten tutkimusten /23/ mukaan ottaa huomioon kaavan (2) avulla:

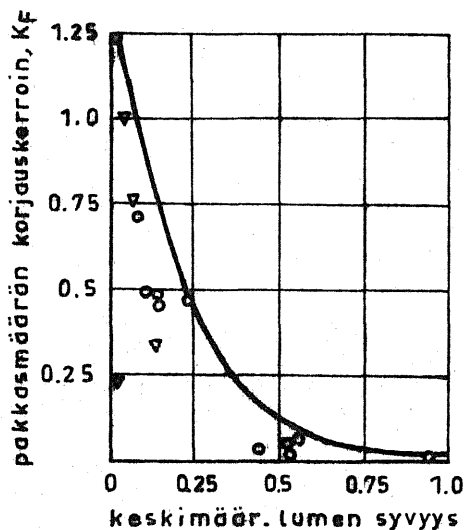
$$F_{\text{maanpinta}} = K_F \cdot F_{\text{(ilma)}}, \quad (2)$$

$F_{\text{(ilma)}}$  on pakkasmäärä ilman lämpötilojen perusteella,  $h^{\circ}C$

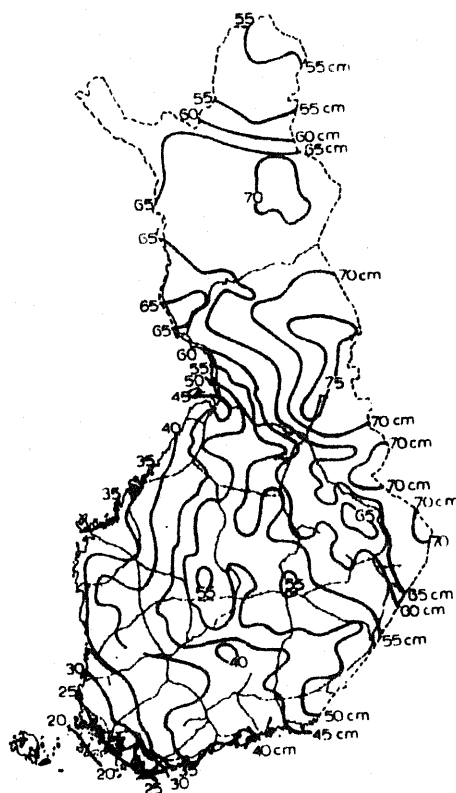
$F_{\text{maanpinta}}$  on maanpinnan pakkasmäärä,  $h^{\circ}C$

$K_F$  korjauskerroin

Kuvassa 6 /23/ on esitetty korjauskerroin  $K_F$  talven keskimääräisen lumen syvyyden funktiona.



Kuva 6. Maanpinnan pakkasmäärän korjauskerroin  $K_F$  talven keskimääräisen lumen syvyyden funktiona /23/.



Kuva 7. Keskimääräinen lumen syvyys kaudella 1921-60 /7/.

Kuvassa 7 /7/ on keskimääräinen lumen syvyys kaudella 1921-60. Patorakenteiden routasuojaus on mitoitettava ottamatta huomioon lumen vaikutusta, lumella on kuitenkin merkitystä lisäsuojana.

## 2.42 Maalajien lämpötekniset ominaisuudet

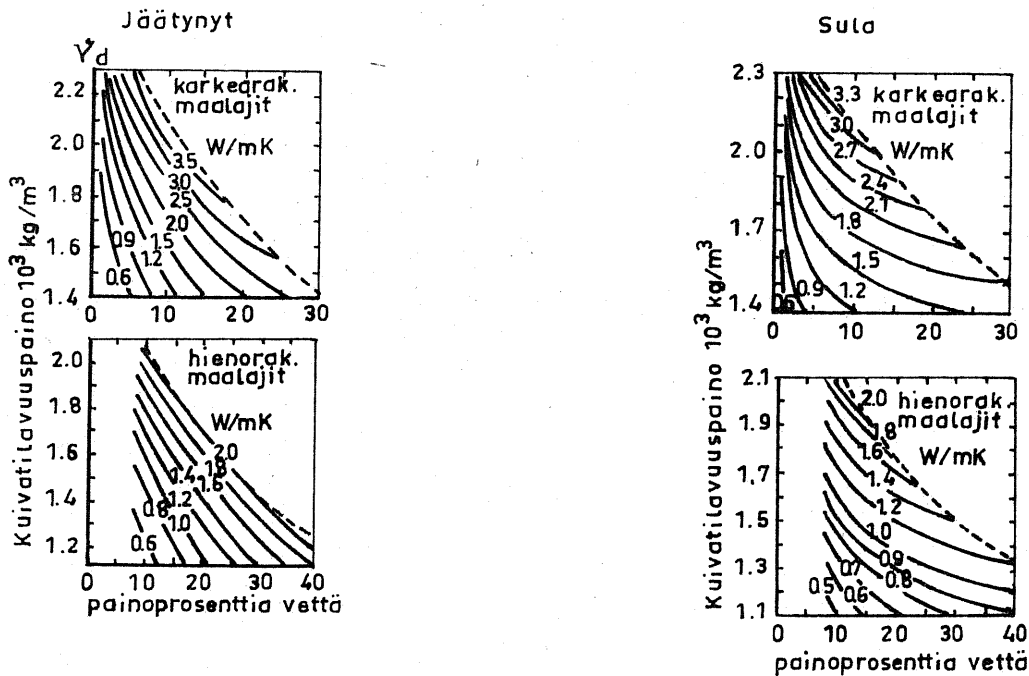
Tärkeimmät lämpötilakenttään vaikuttavat maalajin ominaisuudet ovat lämmönjohtavuus sulana ja jäätyneenä, ominaislämpö sekä jäätyislämpö. Suurin merkitys on yleensä jäätyislämmöllä.

### 2.421 Lämmönjohtavuus

Maalajien lämmönjohtavuuden määrittäminen on eräs tärkeimmistä routaantumisen analysoinnissa eteen tulevista ongelmista.

Maalajien lämmönjohtavuus riippuu olotilasta (sula-jäätynyt), maalajien koostumuksesta, komponenttien lämmönjohtavuudesta sekä maan rakenteesta. Lämmönjohtavuus voidaan määrittää geoteknisten ja mineralogisten maaperätietojen avulla.

Kersten /8/ julkaisi 1949 kivennäismaalajien lämmönjohtavuuksia käsittelevän tutkimuksen. Tutkimuksessaan hän määritteli empiirisesti lämmönjohtavuuden riippuvaisuuden olotilasta, vesipitoisuudesta ja kuivatilavuuspainosta. Kersten on laatinut tekemiensä kokeiden perusteella kuvan 8 mukaiset käyrästöt.



Kuva 8. Kerstenin käyrästöt mineraalimaalajien lämmönjohtavuuksien määrittämiseksi /8/.

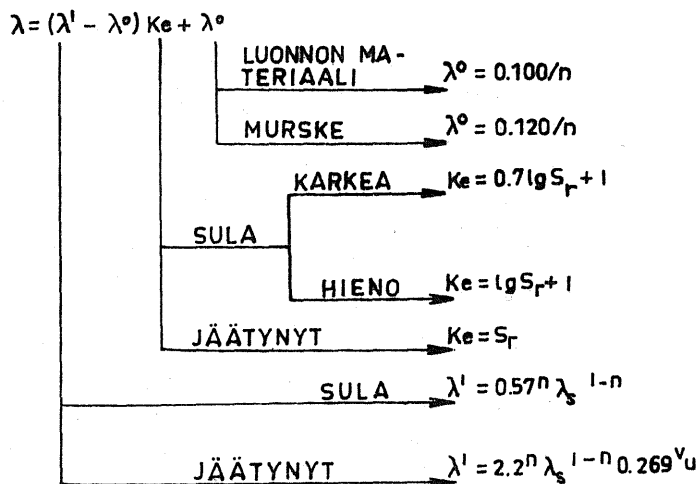
Kerstenin käyrästöt on laadittu keskimääräisen mineraalikoostumuksen perusteella (hiekkä, kvartsipitoisuus 50 %; savi, kvartsipitoisuus 10-20 %). Koska kvartsipitoisuudella on huomattava merkitys lämmönjohtavuuteen, on Johansen /23/ laatinut Kerstenin tulosten pohjalta uuden menetelmän lämmönjohtavuuden määrittämistä varten. Menetelmässä ilmaistaan tietyn kuivatilavuuspainon ja kosteuspitoisuuden omaavan

materiaalin lämmönjohtavuus saman kuivatilavuuspainon omaavan täysin kuivan ja kostean materiaalin lämmönjohtavuuksien sekä dimensiotottoman johtavuusluvun avulla. Johtavuusluku ottaa huomioon kyllästysasteen vaikutuksen. Kaavan muodossa ilmaistuna:

$$\lambda = \lambda^0 + (\lambda^1 - \lambda^0) Ke (S_r), \quad (3)$$

$\lambda^0$  on lämmönjohtavuus kuivalle materiaalille  
 $\lambda^1$  on lämmönjohtavuus kostealle materiaalille  
 $Ke(S_r)$  Kerstenin luku  
 $S_r$  kyllästysaste

Kuvassa 9 on määritetty eri tekijät.



$n = 1 - \rho_d / \rho_s$ , huokoisuus

$S_r = v/n = w \rho_d / n \rho_w$ , kyllästysaste  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$  vesi  $\rho_w = 920 \text{ kg/m}^3$ , jää

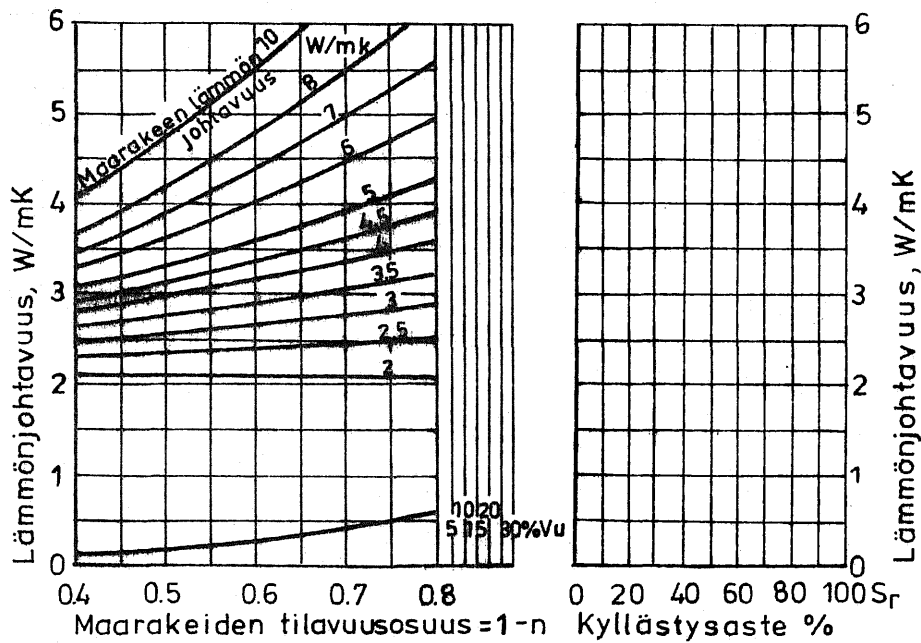
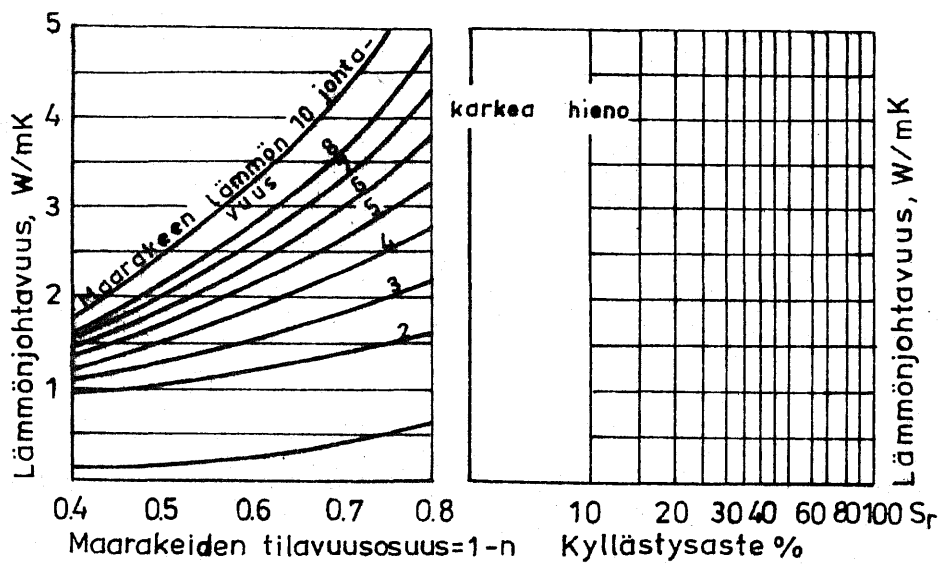
$v_u$  = tilavuuspros. jäätymätöntä vettä

$\lambda_s$  = maarakeiden lämmönjohtavuus lasketaan kvartsipitoisuuden tai rakeisuus-käyrän perusteella

Kuva 9. Kivennäismaalajien lämmönjohtavuuksien laskentamalli.

Karkearakeiset : ei sisällä alle 0,002 mm:n ainesta.

Hienorakeiset: sisältävät merkittävästi 0,05 mm hienompaa ainesta /23/.

JÄÄTYNYT MAASULA MAA

Kuva 10. Johansenin käyrästöt mineraalimaalajien lämmönjohtavuuksien määrittämiseksi /23/.

Maarakeiden lämmönjohtavuus  $\lambda_s$ , ratkaistaan kvartsipitoisuuden tai maalajin rakeisuuskäyrän perusteella (taulukko 6).

Taulukko 6. Maarakeiden lämmönjohtavuuden määrittäminen /23/.

Kvartsipitoisuus	Materiaalista rakeisuudeltaan <0.02 mm	Ominaispaino, kg/m <sup>3</sup>	
		≈ 2.700	≥ 2.900
Tuntematon	< 20 % > 60 %	4.5 2.5	3.5
Tunnettu	< 20 % > 60 %	$2^{1-q} \cdot 10^q$ $2^{1-q} \cdot 10^q$	$3^{1-q} \cdot 10^q$

Johansen on edelleen laajaan tutkimusaineistoon perustuen laatinut kuvan 10 mukaiset käyrästöt lämmönjohtavuusarvojen määrittämistä varten. Vesipitoisuus vaikuttaa huomattavasti lämmönjohtavuusarvoihin, ja täten maarakenteiden vesipitoisuuden arvioinnista aiheutuva virhe voi johtaa huomattavasti todellisista lämmönjohtavuusarvoista poikkeaviin tuloksiin.

#### 2.422 Ominaislämpö ja lämpökapasiteetti

Maan ominaislämpö riippuu maan koostumuksesta ja kunkin osan ominaislämmöstä. Asia voidaan ilmaista kaavan (4) muodossa.

$$c = \frac{1}{\rho} (c_1 \cdot \rho_1 \cdot n_1 + c_2 \cdot \rho_2 \cdot n_2 + \dots + c_i \cdot \rho_i \cdot n_i), \quad (4)$$

$$\begin{array}{ll}
 c_i & \text{on ainesosasen } i \text{ ominaislämpö, } \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \\
 \rho_i & \text{on ainesosasen } i \text{ tiheys} \\
 n_i & \text{on ainesosasen } i \text{ tilavuusosuus} \\
 \rho = \sum_{i=1}^n c_i \rho_i & \text{kokonaistiheys}
 \end{array}$$

Maan lämpökapasiteetti saadaan ratkaistua kaavan (5) avulla:

$$C = c \cdot \rho, \quad \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{K}} \quad (5)$$

Taulukossa 7 /23/ on esitetty eräiden materiaalien ominaislämpöjä 0°C:ssa.

Taulukko 7. Eräiden aineiden ominaislämpöarvoja 0°C:ssa /23/.

Aine	Ominaislämpö [ $\frac{J}{kgK}$ ]
Vesi	4200
Jää	2040
Kiviaines	700
Orgaaninen aines	1200

Veden jäätyislämmöllä on huomattavin merkitys routaantumistapahtumassa. Parhaiten jäätyislämpö voidaan analyysissa huomioida lämpökapasiteetissä kaavan (6) mukaan:

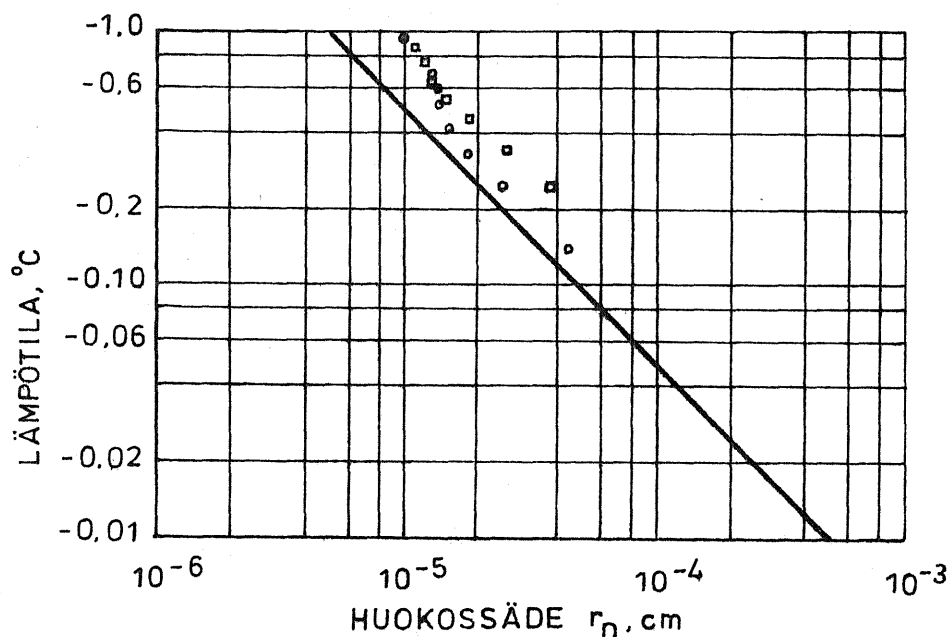
$$C = i \cdot \gamma_w \cdot \frac{dw_u}{dT} + \sum c_i \cdot \rho_i \cdot n_i, \quad (6)$$

$i$  on veden jäätyislämpö,  $93 \frac{Wh}{kg}$   
 $w_u$  jäätyttömän veden paino-osuus, kg/kg kuiva-ainesta  
 $T$  lämpötila, °C  
 $\sum c_i \cdot \rho_i \cdot n_i$  ainesosasten lämpökapasiteetti  
 $\gamma_w$  veden tilavuuspaino

Routimiseen liittyvä veden imeytyminen muuttaa jäätyislämpöä ja täten lämpökapasiteettia. Imeytyvän veden määrän arvioinnin vaikeus aiheuttaa virhettä lämpökapasiteetin määrittämiseen ja täten roudan syvyyden laskemiseen.

#### 2.423 Jäätymispiste

Maahiukkasan ja samalla huokoskoon pienetessä laskee maassa olevan veden jäätymispiste. Williams /31/ on tutkimuksissaan todennut kuvan 11 mukaisen riippuvuuden huokoskoon ja veden jäätymispisteen välille.



Kuva 11. Huokoskoon ja veden jäätymispisteen välinen riippuvuus /31/.

Näin ollen maan koostuessa riittävän pienistä erikokoisista rakeista ei kaikki siinä oleva vesi jäädy  $0^{\circ}\text{C}$ :ssa, vaan veden jäätyminen tapahtuu enemmän tai vähemmän nollasta alaspäin poikkeavan lämpötila-alueen sisällä. Veden jäätymislämpötila-alue on sitä suurempi mitä suhteistuneemmasta routivasta maalajista on kysymys. Täten savi- ja silttimoreeneilla on jäätymislämpötila-alue laajimmillaan. Roudan syvyyden laskennassa tehty oletus kaiken veden jäätymisestä  $0^{\circ}\text{C}$ :ssa, johtaa täten liian pieniin roudan syvyyden arvoihin. Toisaalta routivilla maalajeilla tapahtuvan veden imeytymisen huomioimisen puute vaikuttaa laskennassa toiseen suuntaan antaen liian suuria arvoja roudan syvyyksille, joten edellä mainituista tekijöistä johtuva virhe ei kohoa kovin suureksi.

## 2.5 ROUDAN SYVYYDEN LASKENTAMENETELMÄT

### 2.51 L ä m m ö n s i i r t y m i n e n m a a s s a

Roudan syvyyden laskemista varten on tunnettava lämmön siirtymisen perusteet maassa. Lämmön siirtyminen maassa tapahtuu:

- johtumalla maarakeissa ja niitä ympäröivässä vedessä sekä ilmassa
- säteilynä huokosissa
- konvektiivisesti liikkuvan veden tai ilman välityksellä.

Käytännön laskelmia varten ei mikroskooppisia lämmönsiirtymisilmiöitä voida tarkastella niiden monimutkaisuuden takia, vaan tapahtumat kuvataan makroskooppisina ja keskimääräisinä.

Lämmönsiirtymisprobleemien käsittelyssä on käytetty Fourier'in yleisen yksisuuntaisen lämmönvirtauksen differentiaaliyhtälöä /21/:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (7)$$

t aika

x matka

Merkittäessä kaavassa (7)  $a = \frac{\lambda}{C\rho}$ , kaava saa muodon (8):

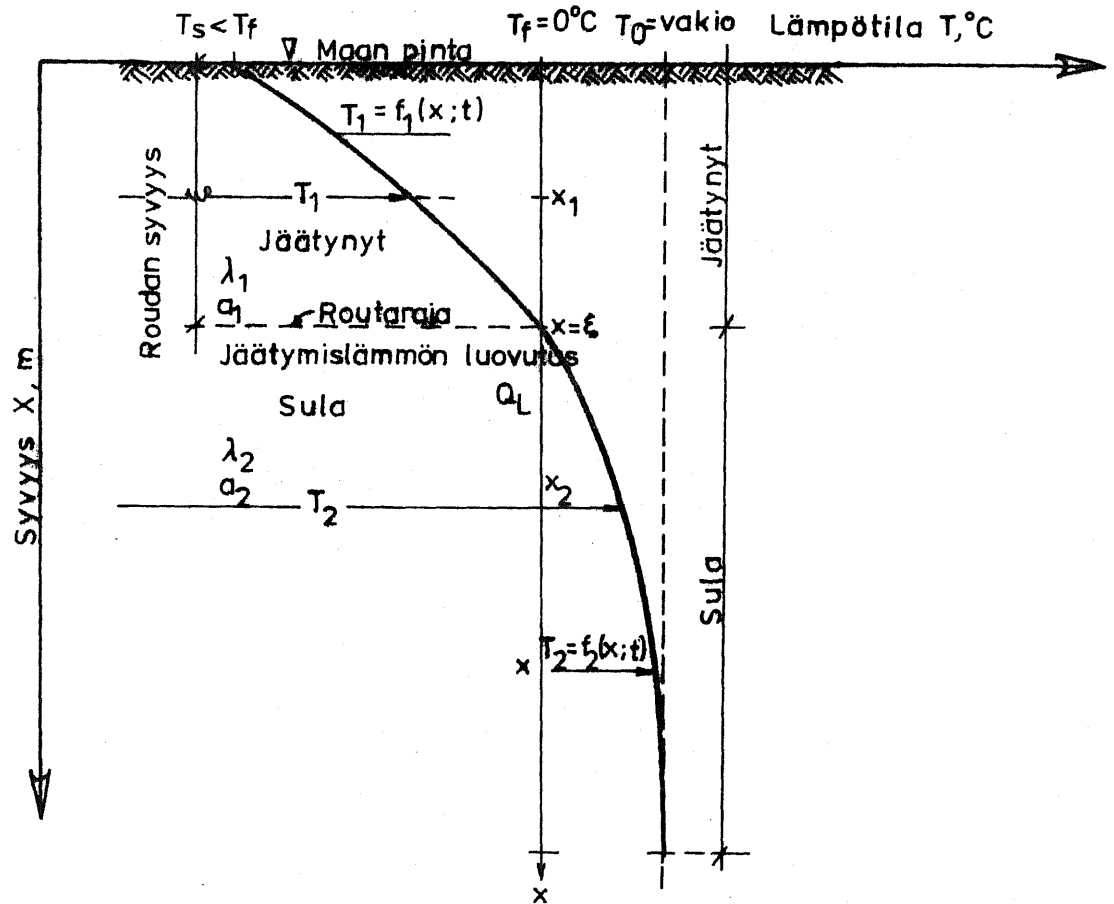
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (8)$$

Vakio a:ta kutsutaan lämpötilanjohtoluvuksi. Yhtälön (7) ratkaisun vaikeutena on veden jäätyminen huomioon. Veden jäätyminen voidaan parhaiten ottaa huomioon lämpökapasiteetissä (kts. 2.422).

## 2.52 Neumann'in menetelmä

Neumann /4/ kehitti alunperin teoriansa tutkiakseen veden jäätymistä. Teoriaa voidaan kuitenkin soveltaa myös roudan syvyyden ratkaisemiseen.

Lähtökohtana on lämpötasapainon tarkastelu routarajalla. Jäätynyttä maata tarkastellaan isotrooppisena, kosteana puoliava-ruutena, jonka lämpötila on alunperin positiivinen vakio  $T_0$ . Lämpötila routarajalla oletetaan  $0^\circ\text{C}$ :ksi. Tietyllä hetkellä  $t = 0$  laskee maanpinnan lämpötila  $T_s$ :ään pysyen sen jälkeen vakiona. Lämpötilan jakautuminen maassa oletetaan kuvan 12 mukaiseksi.



Kuva 12. Lämpötilan jakautuminen maassa Neumann'in mukaan /4/.

Lämmönvirtausta maassa kuvataan Fourier'in lämmönjohtumisen differentiaaliyhtälöillä:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad \text{Jäätynyt maa}$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad \text{Jäätymätön maa}$$

Routarajan edetessä  $d\xi$  :n verran ajassa  $dt$ , jäätyy kerros  $dV = A d\xi$ . Maan vesipitoisuuden ollessa  $w$  %-kuivapainosta, on tilavuusyksikön sisältämä vesimäärä  $\gamma_w w$  ja jäätymislämpö  $i\gamma_w w$ . Tällöin saadaan routarajalle  $x = \xi(t)$  seuraava lämpötasapaino:

$$\lambda_1 \cdot \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{\xi} \cdot A \cdot dt - \lambda_2 \cdot \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{\xi} \cdot A \cdot dt = i \cdot \gamma_w \cdot w \cdot A \cdot d\xi$$

Lämpötasapainoyhtälön ratkaisuksi saadaan yhtälö (9).

$$w \cdot i \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot m = b_1 \cdot (T_f - T_s) \cdot \frac{e^{-\frac{m^2}{4a_1}}}{G\left(\frac{m}{\sqrt{4a_1}}\right)} - b_2 (T_0 - T_f) \cdot \frac{e^{-\frac{m^2}{4a_2}}}{1 - G\left(\frac{m}{\sqrt{4a_2}}\right)}, \quad (9)$$

$$b = \sqrt{\lambda C \gamma}$$

$$G(x) = \frac{x}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta \quad \text{on Gaussin todennäköisyys-}$$

integraali

$$T_f = 0^\circ\text{C}$$

$$T_0 = \text{vakio}$$

$$T_s = \text{maanpinnan lämpötila}$$

Yhtälöstä (9) saadaan  $m$  ratkaistua parhaiten graafisesti, sillä yhtälön vasen puoli on suora ja oikea puoli transkendenttinen käyrä. Suora ja käyrä leikkaavat aina vain yhdessä pisteessä, joten yhtälöllä on vain yksi juuri  $m_1$ , jonka avulla voidaan laskea roudan syvyys  $\xi$  halutulla hetkellä.

$$\xi = m\sqrt{t}$$

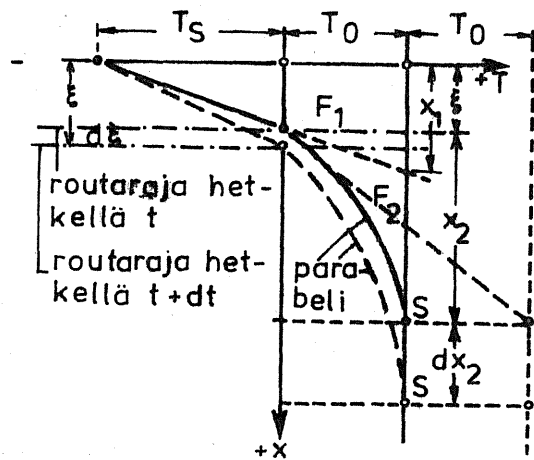
$$(10)$$

Yhtälössä (9)  $T_0$ :ksi asetetaan tavallisesti vuoden keskilämpötila. Edelleen veden jäätymislämpötila  $T_f$  oletetaan  $0^\circ\text{C}$ :ksi ja  $T_s$ :ksi asetetaan pakkaskauden keskilämpötila.

Neumann'in laskentamalli on suhteellisen tarkka, mutta sangen työläs. Käytännössä on m:n ratkaisua varten kehitetty nomogrammeja, joiden avulla ratkaisu saadaan helpohkosti.

### 2.53 R u c k l i ' n m e n e t e l m ä

Ruckli /21/ on menetelmässään lähtenyt liikkeelle Neumann'in tarkasta ratkaisusta luoden käytännön tarpeisiin soveltuvan laskentamallin. Mallissa on korvattu Gaussin todennäköisyysintegraalin mukainen lämpötilajakautuma jäätyneessä maassa suoralla ja sulassa maassa parabelilla (kuva 13).



Kuva 13. Lämpötilajakautuma maassa Rucklin /21/ mukaan.

Roudan syvyyden määrittämiseen on johdettu kaava (11).

$$\xi = L\sqrt{t} \quad , \quad (11)$$

kun 
$$L = \sqrt{2A+B^2} - B$$

Kertoimille A ja B on saatu seuraavat lausekkeet:

$$A = \frac{-\lambda_1 T_s}{(n_i - 1/2 T_s C_1 + T_o C_2)}$$

$$B = \frac{\lambda_2 T_o \sqrt{\frac{1-m}{3a_2}}}{n_i - 1/2 T_s C_1 + T_o C_2}$$

Suhteellisuustekijä m voidaan ratkaista kaavasta (12) olosuhteisiin soveltuvilla pakkasajan t ja roudan syvyyden  $\xi$  arvoilla.

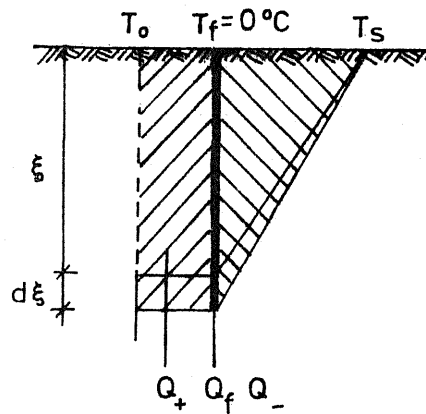
$$m = \frac{\xi}{\sqrt{\frac{12 a_2 t}{1-m}}} \quad (12)$$

Alaindekseistä 1 viittaa jäätyneeseen ja 2 jäätymättömään maakerrokseen.

## 2.54 Watzinger'in ja Beskow'in menetelmät

Norjalaiset Watzinger, Kindem ja Michelsen esittivät 1938 Stefanin jään paksuuden laskemismallin pohjalta uuden roudan syvyyden laskentamenetelmän /30/. Mallissa on huomioitu myös jäätyneen maan jäähtymisestä vapautuva lämpö.

Watzinger oletti lämpötilajakautuman maassa Stefanin /30/ mukaisesti lineaariseksi (kuva 14). Kuvassa oikealla oleva kolmio edustaa jäätyneen maan jäähtymislämpöä ( $Q_-$ ), keskellä oleva musta suorakulmio veden jäähtymislämpöä ( $Q_f$ ) sekä vasemmalla oleva suorakaide jäätymättömän maan jäähtymislämpöä ( $Q_+$ ).



Kuva 14. Lämpötilajakautuma maassa Watzingerin mukaan /30/.

Lämpömäärille  $dQ$  routarajan edetessä matkan  $d\xi$  saadaan:

$$dQ_- = \gamma \cdot C_1 \cdot 1/2 (T_f - T_s) d\xi$$

$$dQ_f = i \cdot w \cdot \gamma \cdot d\xi$$

$$dQ_+ = \gamma \cdot C_2 \cdot (T_0 - T_f) d\xi$$

Edelleen saadaan:

$$\lambda_1 \frac{(T_f - T_s)}{\xi} \cdot dt = dQ = dQ_+ + dQ_f + dQ_- ,$$

josta seuraava integroimalla

$$\xi = \sqrt{\frac{2\lambda_1 F}{q}} , \quad (13)$$

$$q = \frac{dQ}{d\xi} = \gamma \cdot C_2 \cdot (T_0 - T_f) + i \cdot w \cdot \gamma + \gamma \cdot C_1 \cdot 1/2 \cdot (T_f - T_s) \quad (14)$$

$F$  on pakkasmäärä

Watzingerin kaavan puutteena on, että lämmönluovutus jääty-  
mättömästä maasta on tavallisesti suurempi kuin menetelmäs-  
sä oletetaan ja kaava antaa sen takia liian suuria roudan  
syvyyden arvoja.

Menetelmälle on esitetty kaavat myös kerroksellisen maarakenteen ratkaisua varten. Tällöin lasketaan kunkin kerroksen jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä. Kerroksen  $n$  pakkasmäärä on:

$$F_n = q_n \cdot \frac{d_n^2}{2} \left( \frac{1}{\lambda_n} + \frac{2}{d_n} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{d_i}{\lambda_i} \right), \quad (15a)$$

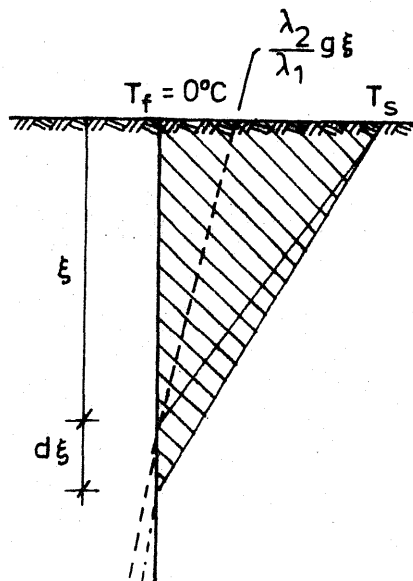
$d_i$  on kerroksen  $i$  paksuus

Mikäli  $\sum_{i=1}^n F_i > F$  lasketaan  $F' = F - \sum_{i=1}^{n-1} F_i$ .  $F'$  sijoitetaan kaavaan (15a) ja lasketaan roudan syvyys  $n$ :ssä kerroksessa,  $\xi_n$ . Roudan kokonaissyvyys on tällöin:

$$\xi = \sum_{i=1}^{n-1} d_i + \xi_n \quad (15b)$$

Beskow /2/ kritisoi norjalaisten laskentamenetelmää, koska menetelmässä ei ole huomioitu sitä lämpömäärää, joka "virtaa" jäätymisrajalle alhaalta päin. Menetelmässä hän esittää tämän lämpömäärän, ns. maalämmön, maan pinnan lämpötilaa kohoittavana tekijänä. Lämpötilan nousu riippuu routarajan alla vallitsevasta lämpötilagradientista.

Lämpötilajakautuma on kuvan 15 mukaisesti oletettu lineaari-



Kuva 15. Lämpötilajakautuma Beskowin mukaan /2/.

seksi ja maan pinnan lämpötila on tällöin merkintöjen mukaisesti:

$$T_{\text{red}} = T_s - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot g \cdot \xi ,$$

$g$  on lämpötilagradientti

Tällöin saadaan roudan syvyyden ratkaisua varten kaava (16):

$$\xi = \sqrt{\frac{2\lambda_1 F'}{q}} , \quad (16)$$

$$F' = \int_{t=0}^F [ (T_f - T_s) - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot g \cdot \xi ] dt$$

$$q = \frac{dQ_f + dQ_+}{d\xi}$$

Käytännössä  $F'$  lasketaan seuraavasti:

$$F' = F - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \beta \cdot g \cdot \xi \cdot t$$

$t$  on pakkaskauden pituus

Kertoimelle  $\beta$  annetaan arvo 1, mikäli  $g \cdot \xi$ :tä pidetään vakiona, ja arvo 2/3, jos  $g$ :tä pidetään vakiona. Kerrokselliselle rakenteelle saadaan:

$$F' = F - \beta \cdot g \cdot t \cdot \lambda_s \cdot \left( \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \right) ,$$

$\lambda_s$  on jäätymättömän kerroksen lämmönjohtavuus

Merkitsemällä  $d_n = \xi - \sum_{k=1}^{n-1} d_k$  saadaan

$$F' = F - \beta \cdot g \cdot t \cdot \lambda_s \cdot \left( \sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} + \frac{\xi - \sum_{k=1}^{n-1} d_k}{\lambda_k} \right) \quad (17)$$

Sijoittamalla kaavalla (17) saatu  $F'$ :n arvo kaavaan (16) saadaan roudan syvyys laskettua. Ratkaisu voidaan suorittaa iteroimalla eli oletetulla roudan syvyydellä lasketaan  $F'$ , jonka avulla lasketaan roudan syvyys kaavalla (16). Näin saatua roudan syvyyden arvoa vertaillaan oletettuun arvoon ja iterointia jatketaan kunnes arvot vastaavat toisiaan riittävällä tarkkuudella.

Skaven-Haug /22/ on esittänyt Watzingerin menetelmän muodossa, jossa on otettu huomioon Beskowin ehdottama lämpötilagradientti. Otetaan käyttöön ns. routavastus. Kerroksen  $n$  routavastus  $\Omega_n$  on

$$\Omega_n = q_n^* \cdot d_n \cdot \left[ \frac{d_n}{2\lambda_{nj}} + \frac{d_1}{\lambda_{1j}} + \frac{d_2}{\lambda_{2j}} + \dots + \frac{d_{n-1}}{\lambda_{n-1,j}} \right], \quad (18)$$

$\lambda_{nj}$  on kerroksen  $n$  lämmönjohtavuus jäätyneenä

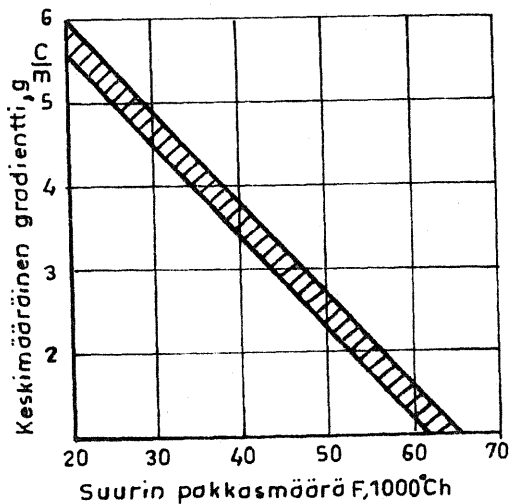
$q_n^*$  on kerroksen  $n$  tehollinen muutoslämpö  $\approx$  kerroksen  $n$  jäätymislämpö  $i \cdot w \cdot \gamma$

Routarajan alapuolisen lämpötilagradientin vaikutus otetaan huomioon termillä  $E = k \cdot \lambda_{s\text{keskim.}} \cdot g \cdot t \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d_n}{\lambda_{nj}}$ . Tällöin roudan syvyys voidaan ratkaista kaavasta (19).

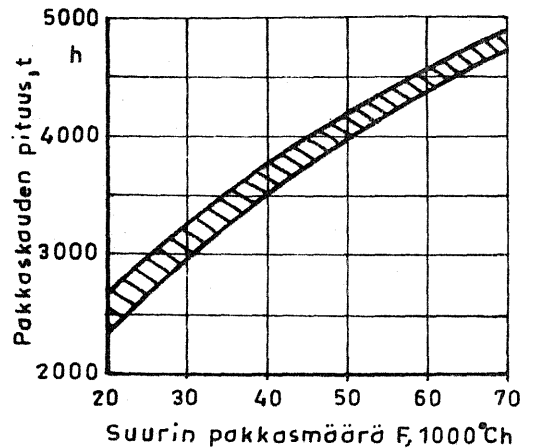
$$F = \sum \Omega_n + E \quad (19)$$

Kertoimelle  $k$  Skaven-Haug on antanut arvon 0,7. Lämpötilagradientin määrittämistä hän on tutkinut eri Pohjoismaista kerätyn ilmasto kuvaavien tilastotietojen pohjalta. Hän on tietojen perusteella määrittänyt pakkaskauden keskimääräisen gradientin routarajan alla. Skaven-Haugin käyrästä on määritetty Suomen olosuhteisiin sopivilla arvoilla maan luonnollinen lämpötilagradientti (kuva 16) /18/.

Kuvassa 17 on esitetty pakkaskauden pituus  $t$  Suomen olosuhteissa /18/.



Kuva 16. Maaperän luonnollinen lämpötilagradientti g /18/.

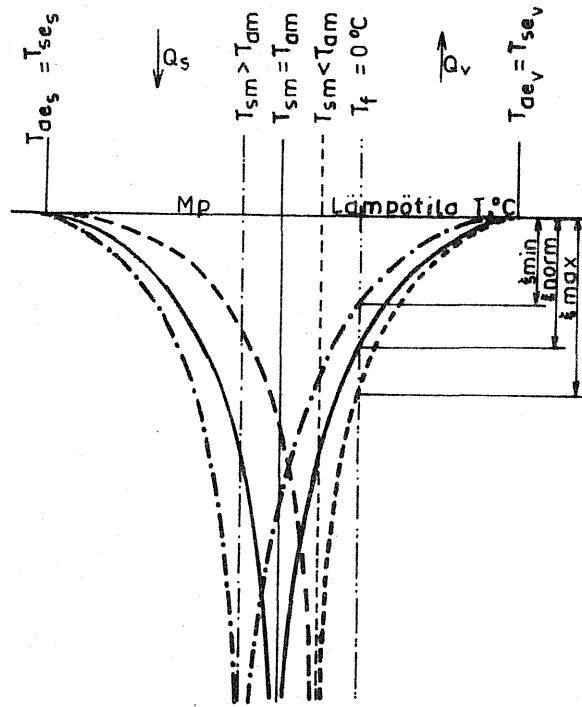


Kuva 17. Pakkaskauden pituus t /18/.

Skaven-Haugin arvot eivät ota huomioon lämpötilagradientin riippuvuutta maalajista. Maalajiominaisuuksista tärkein on lämmönjohtavuus. Mittauksista on todettu, että ne on suurimmaksi osaksi suoritettu routivissa mineraalimaalajeissa. Lämpötilagradientin määrittämisen epätarkkuus on ollut edellä esitettyjen menetelmien heikkoutena. Käytännön tarkasteluja varten edellä esitetyt lämpötilagradientin arvot antavat tulokset riittävällä tarkkuudella.

## 2.55 Janssonin menetelmä

Jansson /5/ on kehittänyt roudan syvyyden laskentamenetelmän, jossa on pyritty huomioimaan maahan kesän aikana varastoitunut lämpömäärä. Mitä korkeampi on maanpinnan vuotuinen keskilämpötila sitä vähemmän maa luovuttaa lämpöä ilmaan pakkaskauden aikana. Tämän mukaan roudan syvyys pienenee, kun maanpinnan vuotuinen keskilämpötila suurenee. Kuvassa 18 /5/ on nähtävissä vuotuisen keskilämpötilan vaikutus roudan syvyyteen.



Kuva 18. Vuotuisen keskilämpötilan vaikutus roudan syvyyteen /5/.

Kuvaan piirrettyjen lämpötilajakautumien ja maanpinnan rajoittamaa aluetta voidaan pitää sinä lämpömääränä, joka kesän aikana varastoituu maahan ja joka pakkaskauden aikana poistuu maasta. Lämpötilajakautumakäyrän eli tautokronin ordinaatta lämpötilalla  $T_f = 0^{\circ}\text{C}$  ilmoittaa roudan syvyyden. Kuvan 18 mukaan maanpinnan keskilämpötilan ollessa sama kuin ilman vuotuinen keskilämpötila  $T_{am}$  saadaan normaali roudan syvyys, kun taas maanpinnan keskilämpötilan ylittäessä ilman vuotuisen keskilämpötilan saadaan pieni ja alittaessa suuri roudan syvyys.

Lähtökohdaksi voidaan ottaa maanpinnan läpi vuosipuoliskon aikana tapahtuvan lämmönvirtauksen yhtälö:

$$Q = (T_{se} - T_{sm}) \sqrt{\frac{2t}{\pi}} \sqrt{C\gamma} \sqrt{\lambda}, \quad (20a)$$

$T_{se}$  on maanpinnan ääriämpötila

$T_{sm}$  on maanpinnan vuotuinen keskilämpötila

Maasta talven aikana yhtälön (20a) mukaisesti poistuva lämpömäärä kuluu lähinnä kolmeen päätarkoitukseen jäätyttömän maan jäädyttämiseen  $0^{\circ}\text{C}$ :een, veden jäätymiseen ja jäätyneen maan jäädyttämiseen. Kyseinen lämpömäärä roudan syvyydellä  $\xi$  voidaan ilmaista seuraavasti.

$$Q = \xi(C\gamma)_2 \psi_2(T_{sm}) + \xi \cdot w \cdot \gamma \cdot i + \xi(C\gamma)_1 \psi_1(T_{se}) \quad (20b)$$

Kaavassa (20b) alaindeksit 1 ja 2 viittaavat jäätyneeseen ja jäätyttömään tilaan. Ilmaisut  $\psi_1(T_{se})$  ja  $\psi_2(T_{sm})$  ovat funktioita maanpinnan alhaisimmasta lämpötilasta ja maanpinnan vuotuisesta keskilämpötilasta. Funktiot on valittu siten, että kun ne kerrotaan roudan syvyydellä, ne edustavat aluetta maanpinnan ja niiden kahden tautokronin välillä, jotka antavat lämpötilajakautuman tarkasteltavan ajanjakson alussa ja lopussa. Alueen  $\xi$   $\psi_1(T_{se})$  arvoksi voidaan olettaa riittävällä tarkkuudella  $0,25 \xi |T_{oe}|$ . Alueelle  $\xi$   $\psi_2(T_{sm})$  on vaikeampaa löytää määrättyä arvoa  $\psi_2(T_{sm})$ :n riippuessa  $\xi$ :stä.  $\psi_2(T_{sm})$  voidaan määrittää kuten kuivalle materiaalille:

$$\ln \frac{T_{sm} + |T_{se}|}{T_{sm}} = \frac{\sqrt{2}(T_{sm} + |T_{se}|)}{\psi_2(T_{sm}) + \psi_1(T_{se})} \quad (21)$$

Kaavoista (20a) ja (20b) saadaan roudan syvyydelle seuraava kaava:

$$\xi = \frac{\sqrt{\frac{2t}{\pi\gamma}} [\sqrt{C_2 \lambda_2} T_{sm} + \sqrt{C_1 \lambda_1} |T_{se}|^\beta]}{C_2 \psi_{2w}(T_{sm}) + C_1 \psi_1(T_{se})}, \quad (22)$$

missä

$$\psi_{sw}(T_{sm}) = \psi_2(T_{sm})$$

$$\beta = \sqrt[3]{1 + \frac{w \cdot i}{C_2 \psi_2(T_{sm}) + C_1 \psi_1(T_{se})}}$$

Maanpinnan lämpötila oletetaan yleensä samaksi kuin ilman lämpötila ja maanpinnan keskilämpötilaksi  $T_{sm}$  sijoitetaan yleensä paikkakunnan vuotuinen keskilämpötila. Maanpinnan ääriämpötila  $T_{se}$  saadaan konstruoimalla joko vuorokauden keskilämpötiloista tai kuukausien keskilämpötiloista sini-käyrä, jonka minimiarvo on  $T_{se}$ . Kyseinen minimiarvo asettuu yleensä hyvin lähelle vuoden kylmimmän kuukauden keskilämpötilaa.

Janssonin menetelmä on havaintojen perusteella antanut melko luotettavia tuloksia. Kun routaantuminen on vähäistä, ei menetelmällä laskettu arvo ole kuitenkaan kovin tarkka, mutta routaantumissyvyyden kasvaessa laskelman tarkkuus paranee. Menetelmä soveltuu lähinnä alhaisen kosteuspitoisuuden omaavien maalajien roudan syvyyden maksimiarvon laskemiseen.

## 2.56 Suomalaisia tutkimuksia

### 2.561 U. Soveri - S. Johansson

Tie- ja vesirakennushallituksessa suoritettiin v. 1958-1964 laaja tierakennuksen routimisongelmia käsittelevä tutkimus. Tutkimus keskittyi selvittämään ilmastollisten tekijöiden vaikutusta routaantumiseen ja roudan sulamiseen lumesta paljaaksi raivatuilla paikoilla /25/.

Tutkimuksen tuloksena esitettiin havaintovuosien maksimi- ja minimipakkasmäärät sekä pakkasmäärien keskiarvot eri säähavaintoasemilla. Lisäksi esitettiin roudan syvyys pakkasmäärän funktiona:

$$d = c\sqrt{F} \quad , \quad (23)$$

$d$  on roudan syvyys, cm

$c = \frac{2\lambda}{q}$  materiaalikerroin

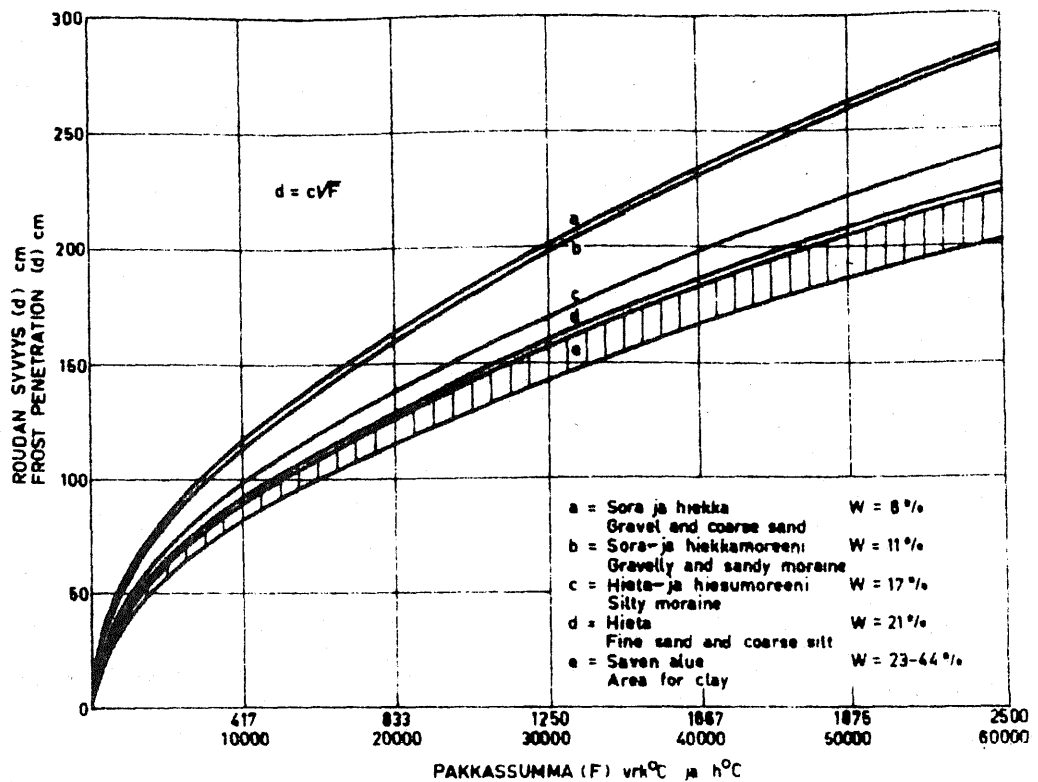
$q$  lämpökapasiteetti

Taulukossa 8 on esitetty materiaalikertoimen arvot eri maalajeille.

Taulukko 8. Materiaalikerroin c eri maalajeille /25/.

Maalaji	Materiaalikerroin c	Vesipitoisuus % kuiva-aineesta
a) Sora ja hiekka	1,159	8,3
b) Sora- ja hiekka- moreeni	1,146	11,3
c) Hieta- ja hiesu- moreeni	0,986	17,5
d) Hieta	0,921	21
e) Savi	0,906-0,828	23,4...44,1

Kuvassa 19 on esitetty TVH:n tutkimusten mukaan roudan syvyyden ja pakkasmäärän välinen riippuvuus.



Kuva 19. Roudan syvyyden ja pakkasmäärän välinen riippuvuus eri maalajiryhmissä lumettomissa olosuhteissa /25/.

## 2.562 Mustosen tutkimus

Tutkimus /14/ on suoritettu maataloushallituksen insinööri-osastossa lumi- ja routahavaintoihin perustuen. Tutkimuksessa selvitettiin tilastomatemattisin menetelmin ilmasto- ja maastotekijöiden vaikutusta routaantumiseen. Mustonen esitti varianssianalyysin avulla laaditun mallin (24) roudan syvyydelle.

$$X = 45 \lg F - 41 \lg S - 55, \quad (24)$$

X on roudan syvyys, cm

S on lumipeitteen keskisyvyys ajanjaksolla 31.10.-31.3., cm

F on pakkasmäärä 31.3. mennessä, h<sup>o</sup>C

Logaritmit ovat Briggsin logaritmejä.

Kaavalla (24) voidaan huomioida lumipeitteen suojaava vaikutus. Mallin muodostamiseen käytetyt havainnot ovat luonontilaisilta mailta, pelloilta ja metsistä jne. Tutkimusaineiston laadusta johtuen kaava (24) ei anna kovin tarkkoja arvoja maarakenteiden analysoinnissa.

### 3. R O U T I M I N E N M A A P A D O I S S A

#### 3.1 STABILITEETTI

Maapatojen stabiliteetti riippuu patomateriaalin leikkauslujuudesta , padossa vallitsevista virtaussuhteista aiheutuvista huokosvedenpaineista sekä vallitsevista leikkausjännityksistä. Routiminen vaikuttaa näihin tekijöihin lähinnä muuttamalla maan rakennetta sekä vallitsevia virtaussuhteita.

Moreenimaalajien leikkauslujuus voidaan ilmaista ns. Coulombin lujuuslain avulla:

$$s = c + \sigma \tan \phi \quad , \quad (25)$$

$s$  on leikkauslujuus

$c$  koheesio

$\sigma$  murtopintaan vaikuttava normaalijännitys

$\phi$  kitkakulma

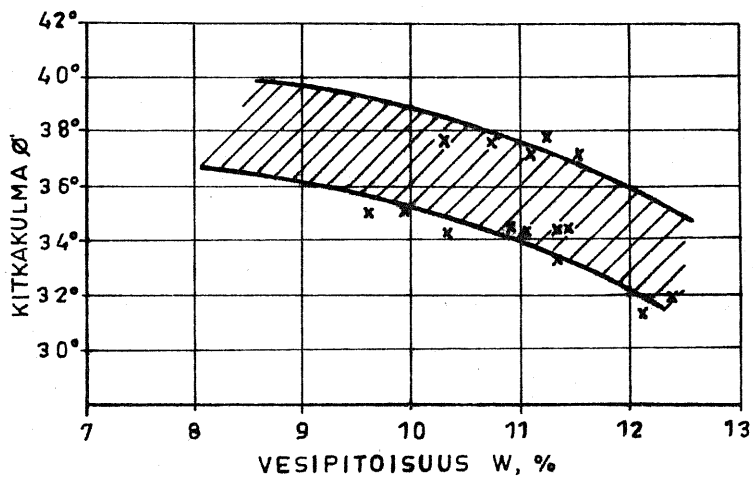
Todellisuudessa leikkauslujuus ei ole riippuvainen murtopintaan vaikuttavasta kokonaisnormaalijännityksestä, vaan tehokkaasta normaalijännityksestä  $\sigma' = \sigma - u$ , kun  $u$  on huokosvedenpaine. Tällöin kaava (25) saadaan seuraavaan muotoon:

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad , \quad (26)$$

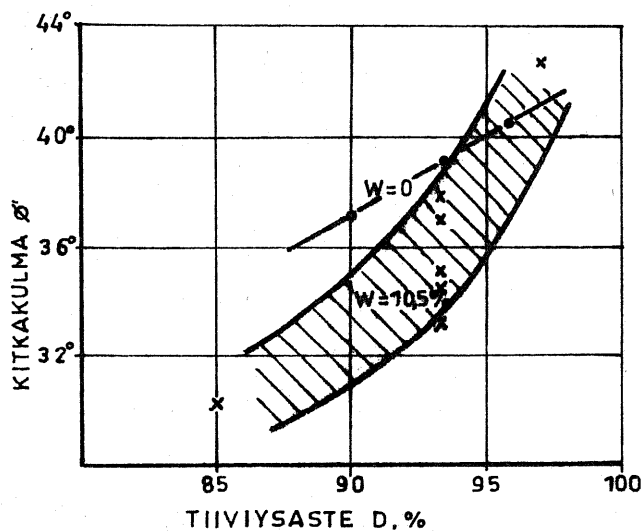
$c'$  on tehokas koheesio

$\phi'$  tehokas kitkakulma

Moreenin leikkauslujuusparametrit riippuvat lähinnä tiiveydestä, vesipitoisuudesta sekä maarakeiden muodosta ja pintarakenteesta. Moreenin routiessa sen vesipitoisuus lisääntyy ja Hautaperän moreenilla suoritettujen kokeiden /10,11/ mukaan vesipitoisuuden lisäys pienentää moreenin kitkakulmaa. Moreenin routimiseen liittyvä jäälinssien synty löyhentää moreenin rakennetta ja aleneva tiiviys pienentää edelleen kitkakulmaa. Vesipitoisuuden ja tiiviiden vaikutus kitkakulmaan on esitetty kuvissa 20 ja 21, joista voidaan havaita kitkakulman vaihtelevan tietyn vyöhykkeen sisällä. Kitkakulman vaihtelu on tutkimuksissa ollut jopa 30 prosentin luokkaa.



Kuva 20. Kitkakulman  $\phi$  riippuvuus vesipitoisuudesta tiiviysasteessa  $D = 93\%$  /11/.



Kuva 21. Kitkakulman  $\phi'$  riippuvuus tiiviysasteesta  $D$  kahdessa eri vesipitoisuudessa (suora  $w = 0$  Kotakorven /10/ mukaan) /11/.

Neuvostoliitossa /28/ määritetään routivan maan leikkauslujuus Coulombin lujuslain mukaan (27):

$$s_u = c_{thd} + \sigma \tan \phi_{thd} \quad , \quad (27)$$

$c_{thd}$  on routivan maan koheesio sulamistilassa

$\phi_{thd}$  on routivan maan kitkakulma sulamistilassa

Lujuusparametrit  $c_{thd}$  ja  $\phi_{thd}$  ratkaistaan kolmiakσιαalikokeen avulla, koetyypin ollessa ns. suljettu koe. Neuvostoliittolaisissa patonormeissa /27/ on annettu ohjeet luiskan stabiliteetin tarkistamiseksi roudan tunkeutumissyvyydellä, mikäli ei käytetä routimatonta materiaalia suojakerroksena. Jos ei suoriteta tarkempaa määrittystä olisi lujuusparametrit (kitkakulmaa ja koheesiota) normien mukaan pienennettävä routivassa kerroksessa 20-30 %.

Routimisen yhteydessä imeytyneen veden sulaminen keväällä kohottaa huokosvedenpaineita, jolloin painearvot poikkeavat gravitaatiovirtauksen arvoista. Tällöin raepaine pienenee edelleen, mikä johtaa alhaisempiin leikkauslujuuden arvoihin. Tutkimustuloksiin viitaten tulisi Suomen oloisakin suorittaa neuvostoliittolaisten normien mukainen tarkistus.

## 3.2 EROOSIO

### 3.21 S i s ä i n e n e r o o s i o

Erosio maapadossa voi olla joko sisäistä tai ulkoista eroosiota. Sisäinen eroosio syntyy padon perustassa tai patorakenteen sisässä suotovirtauksen keskittyessä tiettyyn kohtaan. Suotovirtauksen keskittymistä tapahtuu eri materiaalien rajakohdissa, padossa olevien halkeamien johdosta, vedenläpäisevyydeltään erilaisten kerrosten johdosta jne.

Eroosion synty on joko hetkellistä tai progressiivistä. Hetkellinen eroosio syntyy yleensä huomattavan löyhässä maakerroksessa maamassan lähtiessä liikkeelle vedenpaineen vaikutuksesta. Tällöin eroosion alku on hydraulisen murtuman kaltainen.

Progressiivinen sisäinen eroosio alkaa yleensä kohdasta, jossa padosta tulevan veden virtausnopeus on suurin tai maahiukkasta paikallaan pitävät voimat ovat pienimmillään. Tämä tapahtuu yleensä suotovirtauksen tullessa läpi padon kuivasta luiskasta. Maarakeiden huuhtoutuessa pois hydraulinen gradientti ja samalla virtausnopeus kasvavat. Tällöin eroosio etenee irroittaen lisää maa-ainesta aiheuttaen lopulta sortuman. Toisaalta löyhään kerrokseen keskittynyt virtaus kuljettaa vähitellen hienon aineksen pois ja aiheuttaa patorakenteeseen lajittuneita kerroksia, joissa virtausnopeudet edelleen kasvavat. Lajittuminen pääsee näin etenemään kasvavalla nopeudella ja tuloksena on lopulta rakenteen sortuminen.

Routiminen aiheuttaa Tsytoovich'in /28/ mukaan kerroksia, jotka ovat vedenläpäisevyydeltään kymmen- jopa satakertaisia routimattomaan kerrokseen verrattuna. Vedenläpäisevyys tosin palautuu sulamisen jälkeen lähestulkoon ennalleen. Toisaalta roudan muodostuminen patopoikkileikkauksen eri osissa, altaan puolella, harjalla tai kuivassa luiskassa on erilaista johtuen veden lämmittävästä vaikutuksesta, kosteuspiitoisuuden vaihtelusta, lumipeitteestä jne. Epätasainen routiminen aiheuttaa rakenteeseen halkeamia pääasiassa padon pituussuunnassa. Edellä mainituista seikoista johtuen vuosittain toistuva routiminen muodostaa patorakenteeseen löyhtyneitä kerroksia, joissa on olemassa edellytykset sisäisen eroosion syntymiselle. Lisäksi rakenteeseen syntyvät halkeamat luovat kohtia, jossa routa tunkeutuu yhä syvemmälle. Zaikoff ja Dascal /32/ ovat ilmoittaneet, että routimisen synnyttämät padon pituussuuntaiset halkeamat Whitehorse'n maapadossa Yokonissa aiheuttivat "huolta" ja korjaustoimenpiteitä. Samankaltaisia havaintoja routimisen aiheuttamista halkeamista on myös Kalajärven maapadolla Peräseinäjoella.

Padon rakennemateriaalin kyky vastustaa sisäistä eroosiota riippuu koheesiosta, tiiveydestä, rakeiden koosta ja muodosta jne. Sherard'in /22/ mukaan suuren plastisuuden omaavilla savilla on paras kyky vastustaa sisäistä eroosiota. Hän on laatinut taulukon 9 mukaisen jaottelun eri maarakennusmateriaalien eroosion kestokyvystä.

Taulukosta voidaan havaita moreenin eroosionkestävyyden vaihtelevan tiivistyksestä riippuen keskinkertaisesta huonoon. Moreenista tehdyn tiivistyssydämen rakenteen tulisi olla mahdollisimman tasalaatuista virtauksen keskittymisien estämiseksi. Täten pitäisi pyrkiä rakenteseen, jossa routiminen ei ulottuisi suotautumisvyöhykkeeseen.

Taulukko 9. Materiaalityypin ja tiiveyden vaikutus maapadon kykyyn vastustaa sisäistä eroosiota /22/.

Eroosion vastustuskyky	Maarakennusmateriaali ja tiivistyksen laatu
Suurin kyky vastustaa sisäistä eroosiota	1. Korkean plastisuuden omaava savi ( $I_p > 15 \%$ ). Hyvin tiivistetty 2. Edellinen materiaali huonosti tiivistettynä.
Keskinkertainen kyky vastustaa sisäistä eroosiota	3. Suhteistunut karkea hiekka tai hiekan ja soran sekoitukset sideaineena savi, jolla on keskinkertainen plastisuus ( $I_p > 6 \%$ ). Hyvin tiivistetty. 4. Edellinen huonosti tiivistettynä 5. Suhteistunut koheesioton sora-hiekka-siltti-sekoitus ( $I_p < 6$ ). Hyvin tiivistetty.
Huono kyky vastustaa sisäistä eroosiota	6. Edellinen huonosti tiivistettynä 7. Hyvin tasarakeinen hieno koheesioton hiekka ( $I_p < 6$ ). Hyvin tiivistetty. 8. Edellinen huonosti tiivistettynä

### 3.22 Ulkoinen eroosio

Epätasainen routiminen aiheuttaa moreeniin halkeamia, jotka ovat lähtökohtana muiden olosuhdetekijöiden aiheuttamalle ulkoiselle eroosiolle. Edelleen sulamisaikana tapahtuva routineen kerroksen kyllästyminen vedellä heikentää myös rakenteen eroosion kestävyyttä. Täten halkeillut ja löyhtynyt moreeni on alttiina seuraavien tekijöiden aiheuttamalle ulkoiselle eroosiolle:

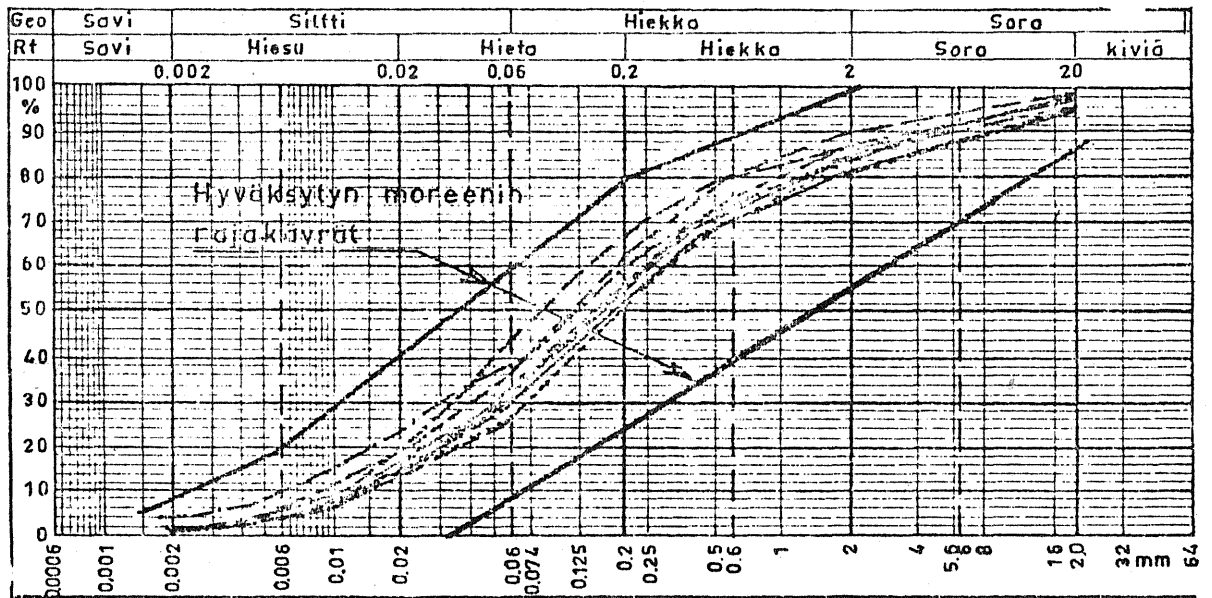
- Padon harjan yli virtaava vesi. Tämä voidaan estää hydrologisiin laskelmiin ja aallon korkeuden määrittämismenetelmiin perustuen tarkoin määritetyllä oikean korkuisella kuivavaralla, sekä patoon sijoitetuilla ylisyöksykynnyksillä.
- Tuuli ja sade sekä muut luonnonvoimat aiheuttavat rakenteen eroosiota. Eroosio voidaan estää käyttämällä rakenteessa esim. erilaisia päällysrakenteita, kuten karkeata sorakerrosta, nurmetusta jne.
- Märän puolen luiskassa aaltojen aiheuttama eroosio. Tämä pyritään estämään suodatinrakenteilla ja verhouksilla.

Roudan edistämässä eroosiossa on kysymys lähinnä rakennus- ja kunnossapitokustannuksista. Rōutivä pīntakerros aiheuttaa jatkuvaa kunnossapitoa, joka tulisi huomioida padon rakennekerrosten teknillis-taloudellisessa vertailussa. Harjan suojauksena voidaan pitää parhaana ratkaisuna muutaman kymmenen senttimetrin sorakerrosta. Paksumman routimattoman kerroksen käyttö ei ole järkevää johtuen lisääntyvästä routaantumisesta. Kuivan luiskan suojauksena on routaantumisen kannalta edullisinta käyttää paksua humusmaakerrosta nurmetuksineen, sillä kerroksen korkea vesipitoisuus sitoo huomattavasti jäätymislämpöä.

#### 4. TUTKITTUJEN PATOJEN RAKENTEET

##### 4.1 LIIKAPURON ALTAAN MAAPATO

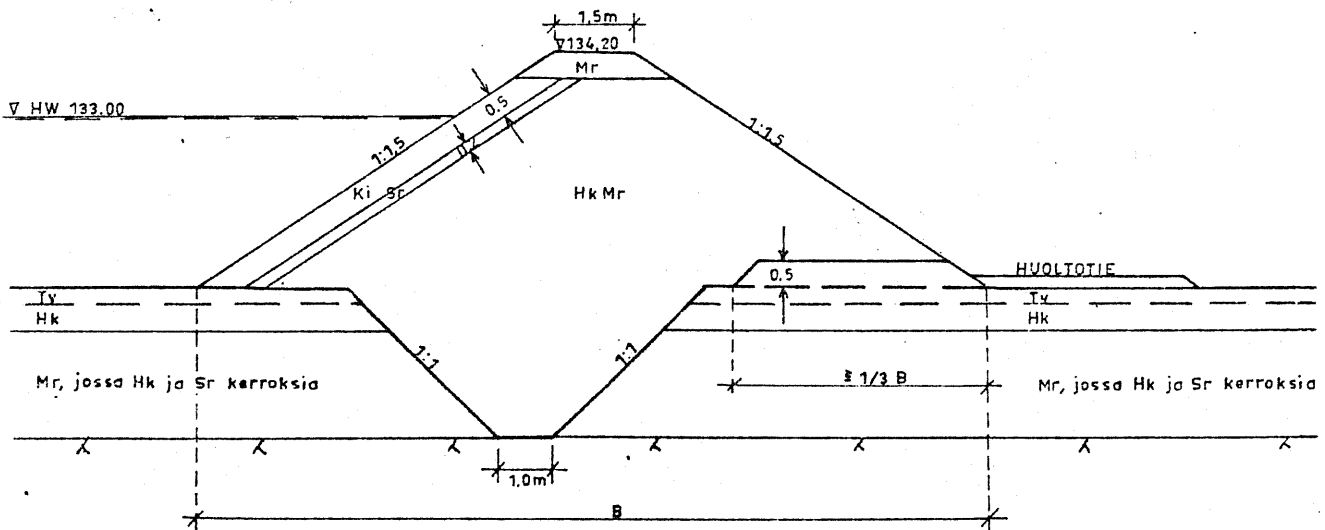
Liikapuron altaan maapato on pääasiassa kalliolle ja moreenille perustettu homogeeninen maapato. Padon tiivistyssydän on rakennettu siltti- ja hiekkamoreenista, jonka tiivistys on suoritettu 0,5-1,0 metrin kerroksissa. Tukipenger on rakennettu samasta materiaalista 0,4-0,6 metrin kerroksissa. Kuvassa 22 on esitetty hyväksytyin materiaalin rajakäyrät sekä rakennusaikaisien rakeisuusmääritysten tuloksia. Käytettyä materiaalia voidaan rakeisuuden perusteella pitää erittäin routivana.



Kuva 22. Liikapuron maapadon moreenivyöhykkeen rakeisuusrajat ja -määritykset.

Padon maksimikorkeus on noin 7 metriä ja molemmat luiskat on rakennettu kaltevuuteen 1:1,5. Suojakerroksina on padon korkeimmilla osilla märän puolen luiskassa 0,5 metrin kiviheitokekerros, jonka alla on 0,2-0,3 metrin vahvuinen sora-suodatin. Matalammilla pato-osuuksilla on märän puolen luiskassa moreenipenger sellaisenaan. Kuiva luiska on verhoiltu

ohuella humusmaakerroksella ja padon harjalla on 0,5 metrin suojakerros karkeasta moreenista. Kuivatusjärjestelmänä toimii suuremmilla painekorkeuksilla padon kuivan luiskan alaosaan rakennettu 0,5 metrin paksuinen sorasuo datin. Padon kuivavara vaihtelee 1,20-1,60 metriin. Tyyppipoikkileikkaus padon rakenteesta on kuvassa 23.

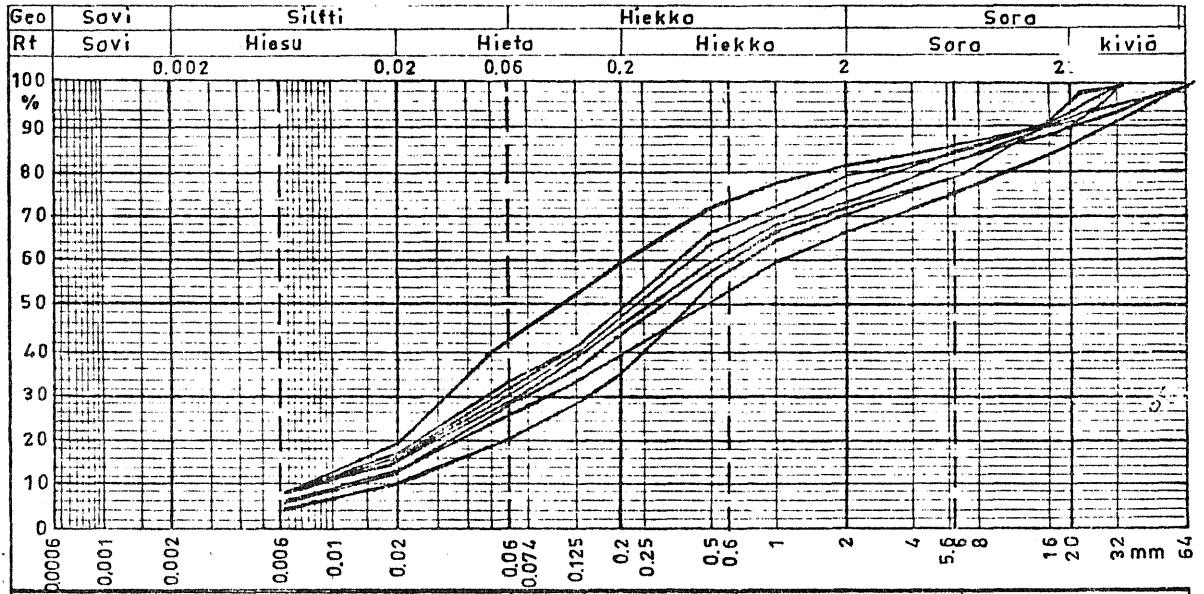


Kuva 23. Liikapuron altaan maapadon rakenne.

Routatutkimusta varten on patoon asennettu routamittareita (liite 1).

#### 4.2 KIVI- JA LEVALAMMEN ALTAAN MAAPATO

Kivi- ja Levalammen maapato on tiiviille pohjamoreenille perustettu homogeeninen maapato. Padon tiivistyssydän ja tukipenger on rakennettu moreenista, joka sisältää hienoa ainesta ( $d \leq 0,074$  mm) vähintään 15 % laskettuna 5,6 mm:ä hienommasta aineksestä. Moreenin tiivistystyön tavoitteena oli tiiviysaste  $D \geq 90$  % ja vedenläpäisevyys  $k \leq 10^{-6,5}$  m/s. Kuvassa 24 on eräitä rakeisuusmäärittämiä rakennustyössä käytettyä moreenista. Moreeni vaihtelee routimisominaisuuksiltaan normaalisti routivasta erittäin routivaan.



Kuva 24. Kivi- ja Levalammen maapadon tiivistyssydämen ja tukipenkereen rakeisuusmäärityksiä.

Padon maksimikorkeus on 9 metriä ja molemmat luiskat on rakennettu kaltevuuteen 1:2. Märän puolen luiskan verhouksena on 0,80 metriä paksu louhoskerros, jossa suurin sallittu lohkokoko on 0,60 metriä. Louhoskerroksen alla on 0,50 metrin vahvuinen sorasuodatin. Padon kuiva luiska on suojattu ohuella humusmaakerroksella ja harjalla on 0,25-0,35 metrin suojakerros sorasta. Padon kuivavara vaihtelee 1,55-1,65 metriin.

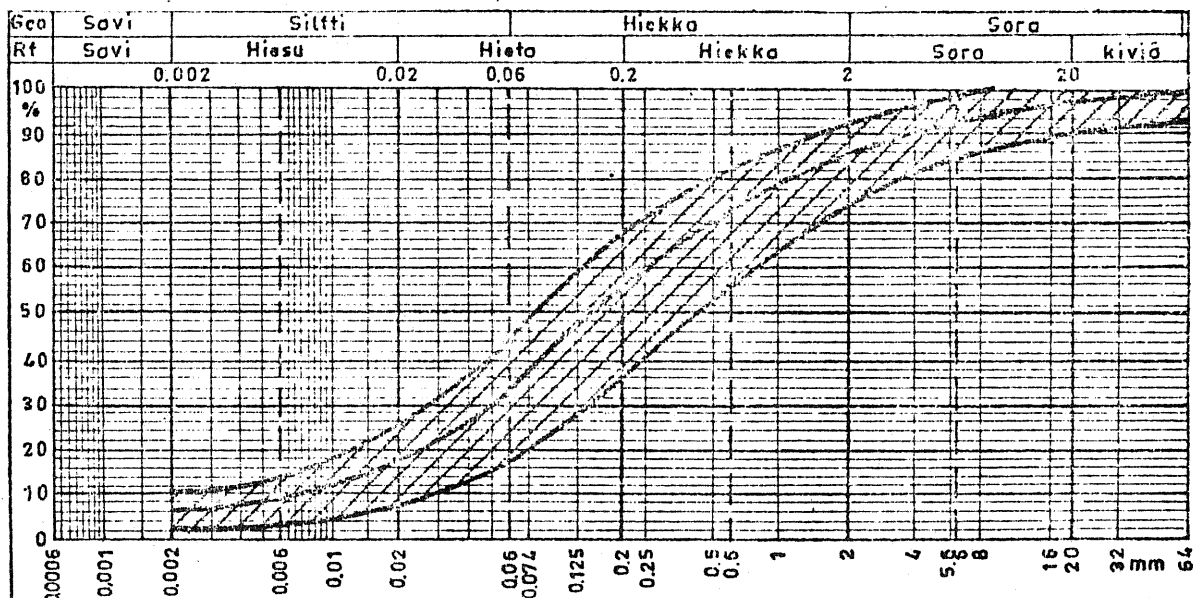
Kuivatusjärjestelmäksi on padon takaluiskan alaosaan rakennettu vaakasuodatin. Suodatin on 0,80 metriä paksu ja sen pituus on 0,7 x kuivan luiskan vaakapituus. Sorasta tehdyn suodattimen vedenläpäisevyyden tulee olla  $k \geq 10^{-5,5}$  m/s. Suotovesien poisjohtamiseksi on suodattimeen asennettu muoviputkisalaoja.

Padon valvontaa varten on rakenteeseen asennettu mm. pohjavesiputkia ja routamittareita. Lisäksi on mitattu suotovesimääriä ns. Thomsonin mittapadolla. Padon toteutunut rakenne ja routamittarien sijoitus ovat liitteessä 2.

## 4.3 HIRVIJÄRVEN ALTAAN MAAPATO

Lapuanjoen järjestelyyn liittyvä Hirvijärven altaan maapato on maksimikorkeudeltaan noin 15 metriä korkea homogeeninen moreenirunkoinen maapato. Pato on perustettu moreenipohjalle tai kalliolle lukuunottamatta lyhyehköjä painopenkereellä vahvistettuja pehmeikköosuuksia.

Padon tiivistyssydän ja tukipenger on rakennettu moreenista, joka sisältää hienoainesta ( $d < 0,074$  mm) vähintään 15 prosenttia laskettuna 5,6 mm:ä hienommasta aineksesta. Moreeni on levitetty ja tiivistetty keskimäärin 0,50 metrin kerroksissa suurimman kivikoon rajoittuessa puoleen kerrospaksuudesta. Moreenin tiivistystavoitteena oli tiiviysaste  $D \geq 90$  % lukuunottamatta pehmeikköosuuksia, jossa tiiviysastevaatimus oli  $D \geq 85$  %. Vedenläpäisevyydestavoitteena oli  $k \leq 10^{-6,5}$  m/s. Hyväksytyyn moreenin rakeisuusalue on kuvassa 25, josta voidaan havaita moreenimateriaalin vaihtelevan lievästi routivasta voimakkaasti routivaan. Hirvijärven maapadolla suoritettiin myös talvirakentamiskokeilu (Kalliomäki 1970).



Kuva 25. Hirvijärven altaan maapadon moreenirungon rakeisuusrajat.

Padon harjan taso on korkeudella +90,50 ja HW = +88,75, joten kuivavaraksi jää 1,75 metriä. Harjalla on suojakerroksena 1 metrin paksuinen louhos- tai sorakerros, jonka alla on edelleen 0,25 metrin kerros soraa.

Märkä luiska on tehty kaltevuuteen 1:2,5 ja kuiva luiska kaltevuuteen 1:2. Suojarakenteina on märällä puolella 0,80 metriä paksu louhoskerros, jonka alla on 0,40 metrin vahvuisen sorasuodatin. Louhoskerroksen suurin sallittu kivikoko on 0,50 metriä. Kuivan luiskan verhoiluna on 0,20-0,30 metrin nurmetetty humusmaakerros.

Padon kuivatusjärjestelmänä toimii padon pohjatasoon rakennettu vaakasuodatin. Suodattimen materiaali on lajittunutta hiekka- tai soramaata. Suodatinmateriaalin vedenläpäisevyys-tavoitteena oli  $k \geq 10^{-5,5}$  m/s. Vedenpoistoa varten on suodattimeen asennettu  $\emptyset 4$  " muoviputkisalaoja, jonka ympärys on täytetty 0,10 metrin kerroksella karkeata soraa.

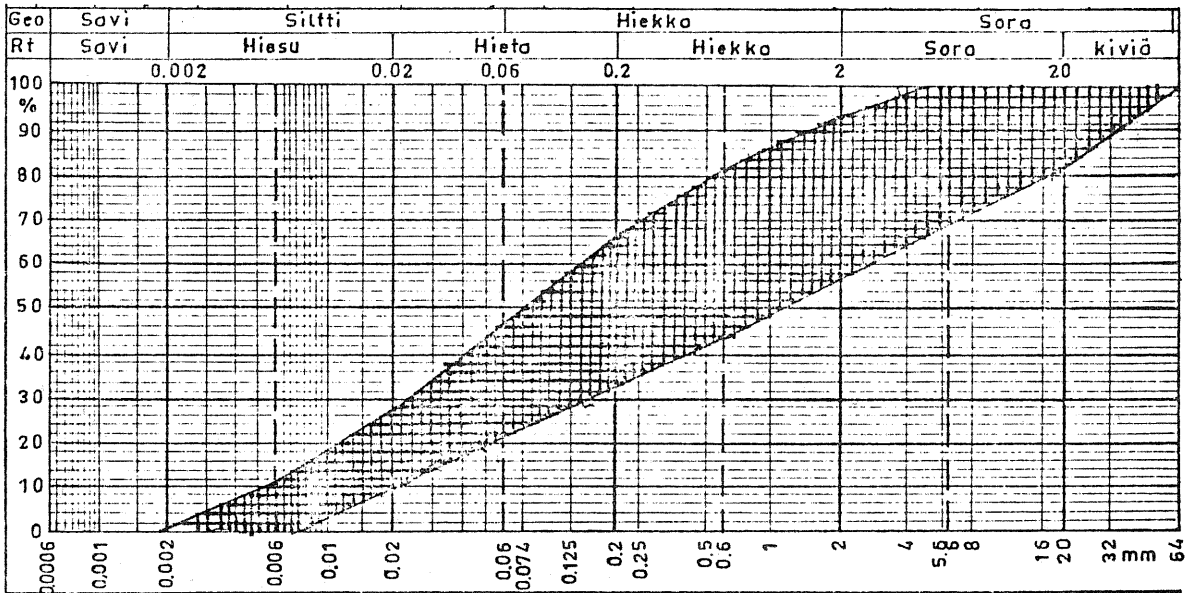
Patoon on valvontaa varten asennettu pohjavesiputkia, huokospainemittareita, suotoveden määrän mittauspatoja sekä routamittareita. Padon poikkileikkaus ja routamittarien sijoitus on esitetty liitteessä 3.

#### 4.4 KALAJÄRVEN ALTAAN MAAPATO

Kalajärven maapato on Kyrönjoen järjestelyyn liittyvä homogeeninen maapato. Pato on perustettu tiiviin pohjamoreenin tai kallion varaan poistamalla padon alta savi- ja siltti-kerrostumat.

Padon tiivistesydamen ja tukipenkereen materiaali on suhteistunutta siltti- ja hiekkamoreenia. Moreeni tiivistettiin 0,80 metrin kerroksissa, suurimman kivikoon ollessa talvityörajan alapuolella 0,20 metriä ja talvityörajan yläpuolella puolet tiivistettävän kerroksen paksuudesta. Tiivistystyössä saavutettu keskimääräinen tiiviysaste oli 92-93 prosentin luokkaa ja rakenteen vedenläpäisevyys oli keskimäärin  $10^{-7}$  m/s. Padon moreenimateriaalin rakeisuusalue on

esitetty kuvassa 26. Moreeni on routimisominaisuuksiltaan lähinnä hyvin routivaa.



Kuva 26. Kalajärven maapadon moreenirungon rakeisuusrajat.

Padon harjan taso on korkeudella +107,20-107,40 ja HW = +105,50, joten kuivavara vaihtelee 1,70-1,90 metrin välillä. Harjan suojaverhouksena on 0,50 metrin sorakerros.

Märkä luiska on patotyypistä riippuen rakennettu kaltevuuksilla 1:1,5, 1:2 ja 1:2,5. Suojauksena on 0,70 metrin kiviheitokekerros, jonka alla on 0,30-0,50 metrin sorasuodatin. Kuivan luiskan kaltevuus on pääasiassa 1:2 ja verhouksena on Curasol-nurmetus.

Kuivatusjärjestelmäksi on padon takaluiskan alaosaan rakennettu sorasta vaakasuodatin. Suodattimen pituus on 0,7 x padon takaluiskan pituus vaakatasossa ja paksuus on 0,8-1,0 metriä. Suotovedet johdetaan pois suodattimeen tehdyissä kivi- tai muoviputkisalaojissa. Kivisalaoja on niillä pato-osuuksilla, jotka on rakennettu talvikautena. Kivisalaojan rakennusmateriaalina on käytetty 50-200 mm:n kiviä. Muoviputkisalaoja (d = 90-100 mm) on tehty rei'itetystä PVC-salaojaputkesta ja putken ympärillä on vähintään 0,20 metrin vahvuinen sorasuodatin.

Patoon on sijoitettu valvontaa varten normaalin käytännön mukaisesti huokospainemittareita, pohjavesiputkia, suoto-veden mittauspatoja sekä routamittareita. Liitteessä 4 on esitetty padon toteutunut poikkileikkaus ja routamittareiden sijainti.

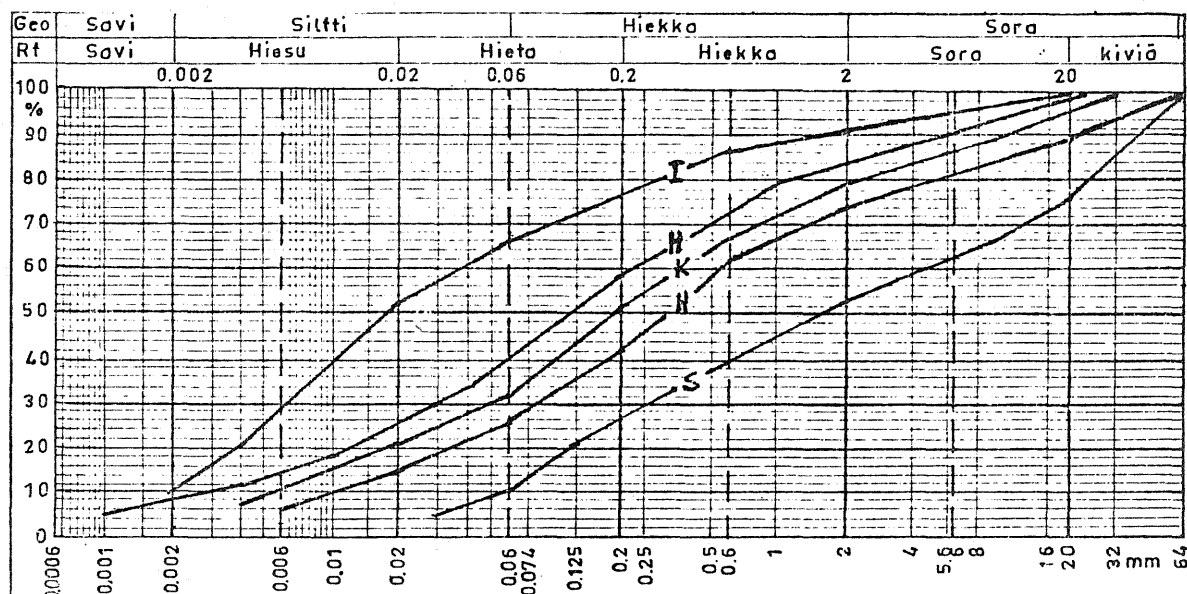
#### 4.5 KYRKÖSJÄRVEN ALTAAN MAAPATO

Kyrkösjärven maapato on Seinäjoella rakenteilla oleva homogeeninen maapato. Padon harjan lopullinen korkeustaso tulee olemaan välillä +82,50 - +82,95, HW:n ollessa tasolla +81,25.

Pato on perustettu joko tiiviille pohjamoreenille tai kalliolle. Padon perustasta on poistettu turve ja humusmaa. Kallion pinnan epätasaisuudet on louhittu kaltevuuteen 1:1 ja kolot on täytetty betonilla. Tiivistyssydämen upotuksen kohdalta on kallion pinta sivelty sementtivellillä.

Tiivistyssydän ja tukipenger on rakennettu paikalta löytyvistä moreeneista. Moreenin hienoainespitoisuuden tulee olla vähintään 15 % niistä lajitteista, jotka läpäisevät 5,6 mm:n seulan. Kuvassa 27 on maapatotyön valvontarekisterin antamat rakeisuudet moreenirunkoon käytetystä materiaalista. Routimisominaisuuksiltaan rakentamisessa käytettyä moreenia voidaan pitää erittäin routivana. Tiivistystavoitteeksi on asetettu 90 %:n tiiviysaste ja vedenläpäisevyyden tulee olla  $k \leq 10^{-6,5}$  m/s.

Luiskat rakennetaan pääasiassa kaltevuuksilla 1:2 ja 1:2,5. Märkä luiska suojataan louhoksesta tehdyllä kiviheitokkeella, jonka kerrospaksuus on 0,70 m suurimman kivikoon ollessa 0,50 m. Matalilla pato-osuuksilla käytetään myös luonnonkiviainesta. Kiviheitokkeen alla on 0,50 m:ä paksu sorasuodatin. Suodattimen tiiviysastevaatimus on 90 % ja suodatin pyritään tiivistämään yhtenä kerroksena. Kuiva luiska verhotaan 0,20 m:n turve- tai ruokamultakerroksella. Padon harja suojataan 0,50 metrin sorakerroksella.



Kuva 27. Kyrkösjärven maapadon moreenirungon rakeisuus

I = minimi

K = keskiarvo

S = maksimi

H = hajonta

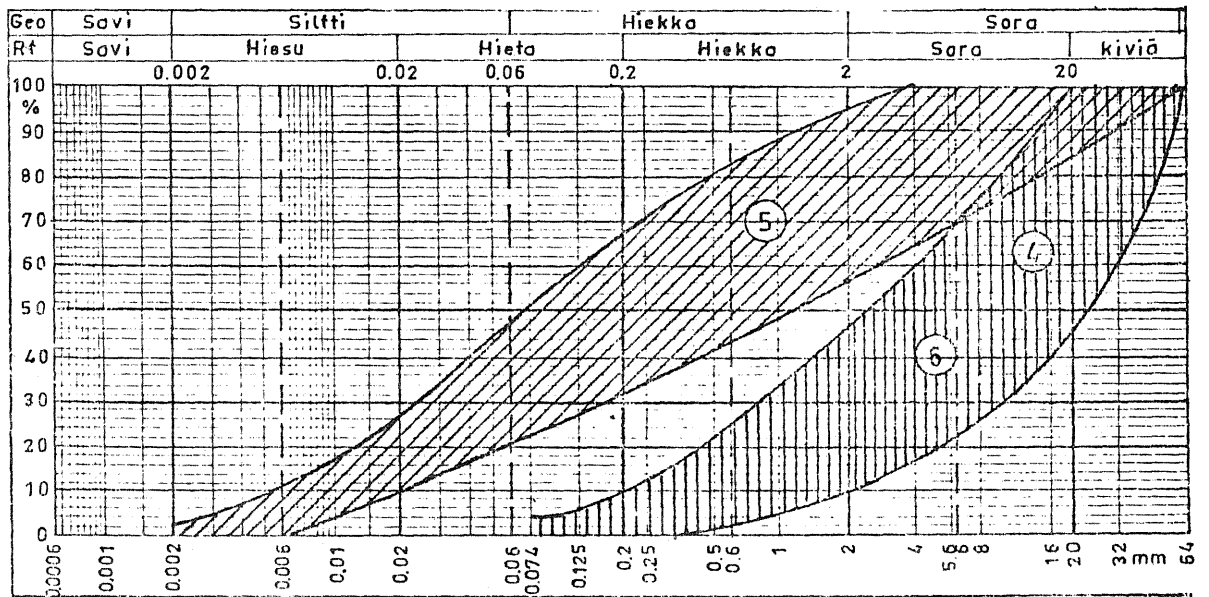
Kuivatusjärjestelmäksi rakennetaan padon takaluiskan alaosaan sorasta vaakasuodatin, jonka pituus on 0,7 x kuivan luiskan vaakapituus. Lisäksi rakennetaan osalle patoa myös pystysuodatin. Vaakasuodattimeen rakennetaan rei'itetystä PVC-salaojaputkesta ( $d = 90-100$  mm) muoviputkisalaoja, jonka ympärille 0,15 m:n laajuudelle tehdään suodatinkerros. Patoon on sijoitettu routatutkimukseen liittyen routamittareita. Vuoden 1979 jälkeinen rakennustilanne ja routamittarien sijainti on esitetty liitteessä 5.

#### 4.6 HAUTAPERÄN ALTAAN MAAPATO

Kalajoen järjestelyyn liittyvän Hautaperän altaan maapato on rakenteeltaan moreenirunkoinen homogeeninen maapato, jonka maksimikorkeus on noin 20 metriä. Padon harjan taso on korkeudella +102,00 ja HW on tasolla +99,75, joten kuivavaraksi jää 2,25 metriä.

Pato on perustettu pääasiassa suoraan maan pinnassa olevien moreeni- tai saven kuivakuorikerrostuman varaan. Osalta patolinjaa on jouduttu poistamaan maan pinnassa olevat turve- ja hietakerrokset, perustamisen tapahtuessa alta paljastuneen moreenin päälle. Koska perustan moreeniaines oli hyvin epähomogeenistä, pyrittiin padon alla tapahtuva suotautuminen pienentämään tiivistyssydämen upotuksella.

Padon tiivistyssydän ja tukipenger on rakennettu läheisiltä maanottoalueilta saadusta suhteistuneesta hieta- ja hiekkamoreenista. Kuvassa 28 on Hautaperän maapadon rakennusmateriaalien rakeisuuden ohjealueet. Moreenirunko on tiivistetty 0,70-0,80 m:n kerroksissa tiiviysastevaatimuksen ollessa 90 % talvirajan alapuolella ja 95 % talvirajan yläpuolella. Padon tiivistyssydämen vedenläpäisevyysvaatimus oli  $k \leq 10^{-7}$  m/s ja pohjamaan  $k \leq 10^{-6,5}$  m/s.



Kuva 28. Hautaperän maapadon rakennusmateriaalien rakeisuuden ohjealueet. Moreenirunko (5). Suodatinsora (4,6).

Märkä luiska on rakennettu kaltevuuksilla 1:1,5, 1:2, 1:2,25 ja 1:2,5. Kuiva luiska on puolestaan tehty kaltevuuteen 1:1,5 yläosastaan ja kaltevuuteen 1:2 alaosastaan. Suojausrakenteena on mässä luiskassa 0,70 m:n kiviheitokekerros ja 0,50 m:n sorasuodatin. Padon korkeimmalla osalla kiviheitokekerros on 1 m:n ja sorasuodatin 0,70 metrin vahvuinen. Kuiva luiska on suojattu 0,20 m:n sorakerroksella, lukuunottamatta paaluväliä 7+60-9+80, jossa ko. kerros on 0,30 m. Padon harjan suojauksena on 0,50 metrin sorakerros.

Kuivatusjärjestelmänä on padon takaluiskassa vaakasuodatin, jonka paksuus vaihtelee 0,50-1,50 metriin. Edelleen on padon korkeimmille osille tasoon +90,00 rakennettu vaakatasoon 0,50 metriä paksu välisuodatin. Tietyillä paaluväleillä on lisäksi pohjasuodatin. Suotovesien poisjohtamista varten on pohjasuodattimeen rakennettu muoviputkisalaoja rei'itetystä PVC-salaojaputkesta (d = 90-100 mm) ja osalla patolinjaa on myös 50-200 mm:n kivistä rakennettu kivisalaoja. Liitteessä 6 on esitetty tyyppiesimerkki padon rakenteesta.

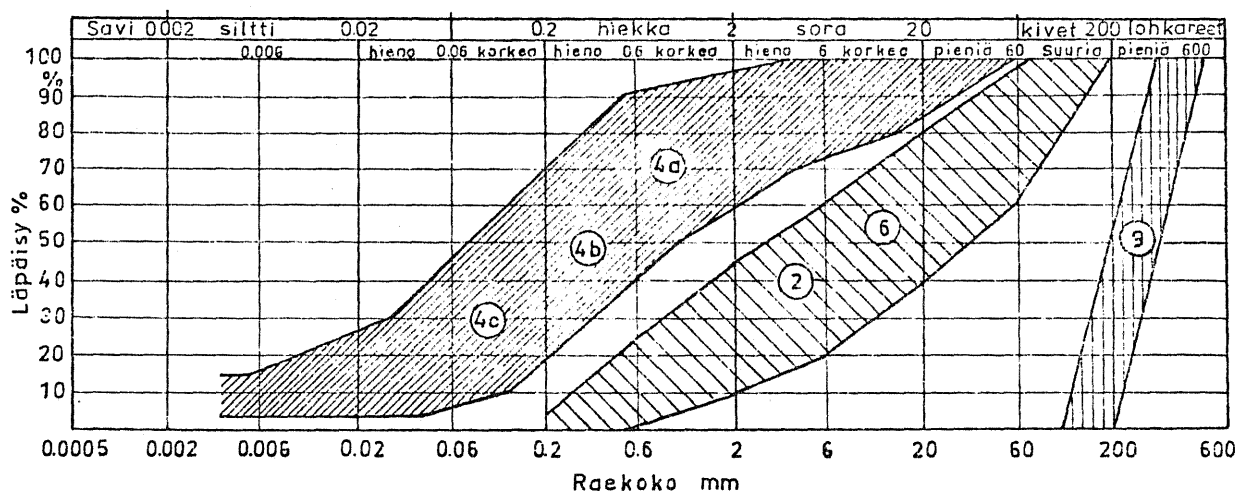
Padossa tapahtui kesällä 1976 altaan täyttämisen jälkeen sortuma kuivassa luiskassa paalulla 10+20 ja lisäksi esiintyi valumia useissa kohdin tasolla 97,00-98,00. Patoa vahvistettiin kuivaan luiskaan levitetyllä sorakerroksella.

Valvontavälineiksi on patoon asennettu huokosvedenpaineen ja suotoveden mittauslaitteita, pohjavesiputkia sekä routamittareita. Routamittarien sijainti selviää liitteestä 7.

#### 4.7 ULJUAN ALTAAN TULISAAREN MAAPATO

Siikajoen säännöstelyyn liittyvän Uljuan altaan Tulisaaren maapato on rakenteeltaan moreenitiivistesydämellä varustettu louhospato (liite 8). Pato on perustettu tiiviin pohjareeenin ja kallion päälle poistamalla perustasta kelpaamattomat perusmaat, joita oli jopa seitsemän metrin vahvuisesti. Kallio injektoitiin padon keskilinjalta 3 metrin reikäväleihin ja 6 metrin syvyydeltä. Lisäksi padon perustan kalliopinta slammattiin.

## Vyöhykkeiden rakeisuusalueiden ohjearvot



Kuva 29. Tulisaaressa maapadon rakennusmateriaalien rakeisuusalueiden ohjearvoja.

- 4 .Tiivistesydämen moreeni
- 2 ,6 .Sorasuodattimet
- 9 .Matalampien pato-osuuksien määrän luiskan kiviheitokekerros.

Tiivistesydän rakennettiin kuvan 29 rakeisuusalueen mukaisesta moreenista. Tiivistystyön tavoitteena oli tiiviysaste  $D \geq 95 \%$  ja vedenläpäisevyys  $k \leq 10^{-6,5} \text{ m/s}$ . Materiaalin hienoainespitoisuuden tuli olla  $\geq 15 \%$  laskettuna 5,6 mm:n seulan läpäisystä aineksesta. Maksimirakekoko sai olla enintään puolet tiivistettävän kerroksen paksuudesta.

Tiivistesydämen molemmille puolille tehtiin 3 metriä paksut sorasuodattimet (liite 8 ja kuva 29). Sorasuodattimen tiiveysvaatimus oli  $D \geq 90 \%$ . Tukipenkereen materiaali on louhosta, jonka rakeisuuden alaraja on kuvan 29 alueen 9 yläraja. Louhoksen suurin sallittu kivikoko oli 1 m. Louhospenkereelle ei asetettu tiiveysvaatimusta, vaan vaatimuksena oli teläkosketusten vähimmäismäärä. Patoa on rakentamisen jälkeen korotettu noin 0,9 metriä ja kuivavara on tällä hetkellä 2,6-2,9 metriä. Valvontaa varten on patoon asennettu normaalit tarkkailuvälit, minkä lisäksi on padon harjalla ollut routamittareita.

## 5. H A V A I N N O T

Tutkimuskohteina olivat talvella 1979-1980 Kalajärven, Hirvijärven, Kyrkösjärven, Kivi- ja Levalammen sekä Liikapuron altaiden maapadot. Padoilla suoritettiin seuraavat mittaukset:

- altaan vesipinta
- suotovedenpinta
- roudan syvyys ja sulaminen
- lumipeitteen paksuus

Mittaukset suoritettiin kerran viikossa lukuunottamatta sulamisaikaa, jolloin mittauksia tehtiin kaksi kertaa viikossa. Edellä mainittujen mittauksien lisäksi on kerätty Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemien tietoja kyseisen ajanjakson lämpötiloista. Lisäksi on käsitelty roudansyvyyshavaintoja vuosilta 1975-1978 Hautaperän altaan maapadosta ja vuosilta 1970-1973 Uljuan altaan Tulisaaressa maapadosta. Lämpötilatiedot näiltä vuosilta on myös kerätty säähavaintoasemien tilastoista.

### 5.1 LÄMPÖTILAT

Ilmastotilastojen lämpötilatietojen perusteella on laskettu havaintokausien pakkasmäärät. Pakkasmäärän laskemisessa käytetyt lämpötilatiedot ovat ilman lämpötiloja, joiden mittaus- tapahtuu 2 metrin korkeudella maanpinnasta. Pakkasmäärät on laskettu sekä vuorokauden keskilämpötilan että kuukauden keskilämpötilan perusteella. Ilman pakkasmäärät voidaan korjata keskimääräisen lumipeitteen paksuuden avulla maanpinnan pakkasmääräksi (kts. 2.412) Taulukossa 10 on lueteltu säähavaintoasema, havaintokausi, havaintoja koskeva pato sekä ilman pakkasmäärät kuukausikeskiarvojen ja vuorokauden keskilämpötilojen avulla laskettuna.

Taulukko 10. Ilman pakkasmäärät havaintokausina.

Säähavainto- asema	Havainto- talvi	Pato	F <sub>kuukausi</sub> [h°C]	F <sub>vuorokausi</sub> [h°C]
Peräseinäjoki	1979-1980	Kalajärvi Liikapuro	24090	24730
Lapua	1979-1980	Kyrkösjärvi Hirvijärvi	24163	24790
Ylistaro	1979-1980	Kivi- ja Levalampi	24017	24698
Vaala-Pelso	1970-1971	Uljua	32120	32470
Vaala-Pelso	1971-1972	Uljua	29930	30487
Vaala-Pelso	1972-1973	Uljua	17228	17460
Haapajärvi	1975-1976	Hautaperä	27813	28810
Haapajärvi	1976-1977	Hautaperä	22557	23724
Haapajärvi	1977-1978	Hautaperä	28762	29851

Havaintokausien pakkasmäärästä voidaan todeta, että talvi-  
kauden 1979-1980 arvot ovat keskimääräistä suurempia vastaten ker-  
ran viidessä vuodessa esiintyviä pakkasmääriä. Vaala-Pelson  
pakkasmäärät ylittävät hieman keskimääräiset arvot lukuun-  
ottamatta talvea 1972-1973, jota voidaan pitää poikkeuksel-  
lisen leutona. Haapajärven pakkasmäärät vuosilta 1975-1976  
ja 1977-1978 vastaavat kerran viidessä vuodessa esiintyviä  
arvoja. Talvea 1976-1977 voidaan Haapajärvellä pitää keski-  
määräisenä.

Tulosten analysoinnissa käytetään kuukausikeskiarvojen avul-  
la laskettuja pakkasmääriä niiden antaessa realistisemmän kuvan  
kokonaispakkasmäärästä. Kuvissa esitetyt pakkasmääräkäyrät  
on kuitenkin piirretty vuorokauden keskilämpötilojen avulla.

Taulukko 11. Talvikauden 1979-1980 keskimääräinen lumipeite ja maanpinnan redusoidut pakkasmäärät F\*.

Pato	Routamittari	Ilman pakkasmäärä F [h°C]	Keskim. lumipeite L [cm]	Maanpinnan pakkasmäärä F* [h°C]
Kala- järvi	Pl. 72+00/1	24090	1	29872
	2	---	78	964
	3	---	28	8913
	Pl. 5+48(M)/4	---	7	23126
	5	---	33	6745
	Pl. 20+00/6	---	2	29389
	7	---	29	8432
Liika- puro	Pl. 12+00/1	---	25	10840
	2	---	63	2409
	Pl. 14+20/3	---	27	9154
	4	---	49	3614
Kivi- ja Leva- lampi	Pl. 8+05 /1	24017	6	23536
	2	---	45	4563
	3	---	25	10808
	Pl. 9+43 /4	---	7	23056
	5	---	31	7926
	Pl. 12+73/6	---	5	25218
	7	---	60	1921
Hirvi- järvi	Pl. 39+00/1	24163	6	24163
	2	---	25	10632
	3	---	26	10873
Kyrkös- järvi	Pl. 37+00/1	---	16	17156
	Pl. 50+00/2	---	5	25371
	Pl. 57+00/3	---	2	27304
	4	---	7	22955
	5	---	24	11115

## 5.2 ROUTAANTUMISANALYYSI

### 5.21 Lumitiedot

Talven 1979-1980 havaintokautena mitattiin lumipeitteen paksuus, jotta pystyttäisiin selvittämään maanpinnan pakkasmäärät ja täten lumen vaikutus routaantumiseen. Lumipeitteen vaikutus huomioidaan talven keskimääräisen lumipeitteen avulla kappaleessa 2.412 esitetyllä tavalla.

Talven keskimääräisen lumipeitteen paksuus on laskettu kuukausien vaihteessa havaittujen lumitietojen keskiarvona. Koska tietoja on tammikuusta 1980 lähtien, on jouduttu oletta-  
maan alkutalven lumipeite. Arviointi on tapahtunut olettamalla lumipeite 0 cm:ksi 1.10., ja kasvaneen siitä lineaarisesti tammikuun alun arvoihin. Koska lumipeitteellä on huomattava vaikutus routaantumiseen, tulee edellä mainitusta arvioinnista johtuen suurilla lumipeitteen paksuuksilla virhettä pakkasmäärän arviointiin. Taulukossa 11 on esitetty kunkin routamittarin osalta keskimääräinen lumitilanne sekä lumipeitteen avulla redusoidut pakkasmäärät F\*.

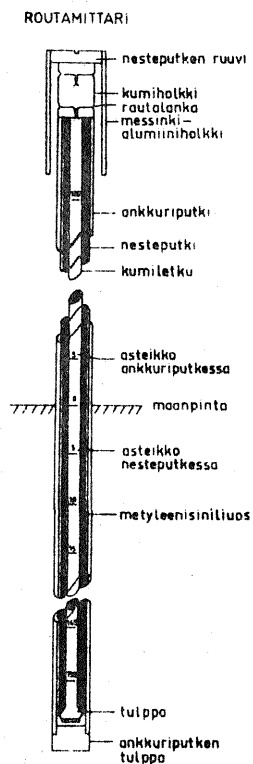
Kuten taulukosta 11 havaitaan on lumipeitteen paksuus vaihdellut huomattavasti. Padon harja on yleensä pysynyt käytännöllisesti katsoen lumettomana tuulen kasatessa lumen kuivan luiskan puolelle.

### 5.22 Roudansyvyshavainnot

#### 5.221 Mittausväline

Mittaus on suoritettu ns. Gandahlin routamittarilla /25/. Mittausmenetelmä perustuu siihen, että tislattuun veteen liotettu metyleenisini muuttuu maassa olevassa routaputkessa värittömäksi veden jäätyessä. Routakerroksen ylä- ja alaraja saadaan tällöin nesteen värin muutoskohtina.

Mittarissa on sisäkkäin kaksi akryylimuoviputkea, joista ulommainen on suoja-putki ja sisimmäinen toimii mittaputkena. Mittaputken alapää on suljettu kumitulpalla, joka toimii myös paineen tasaajana. Mittaputkessa olevasta asteikosta voidaan suoraan lukea roudan syvyys. Mittausmenetelmä antaa hieman liian suuria arvoja, sillä putkessa oleva neste jäätyy 0°C:ssa, kun taas maa jäätyy jonkin verran alhaisemmassa lämpötilassa. Kuvassa 29 on esitetty periaatekuva routamittarista.



Kuva 29. Metyleenisiniroutamittarin periaatekuva /25/.

#### 5.222 Talvikausi 1979-1980

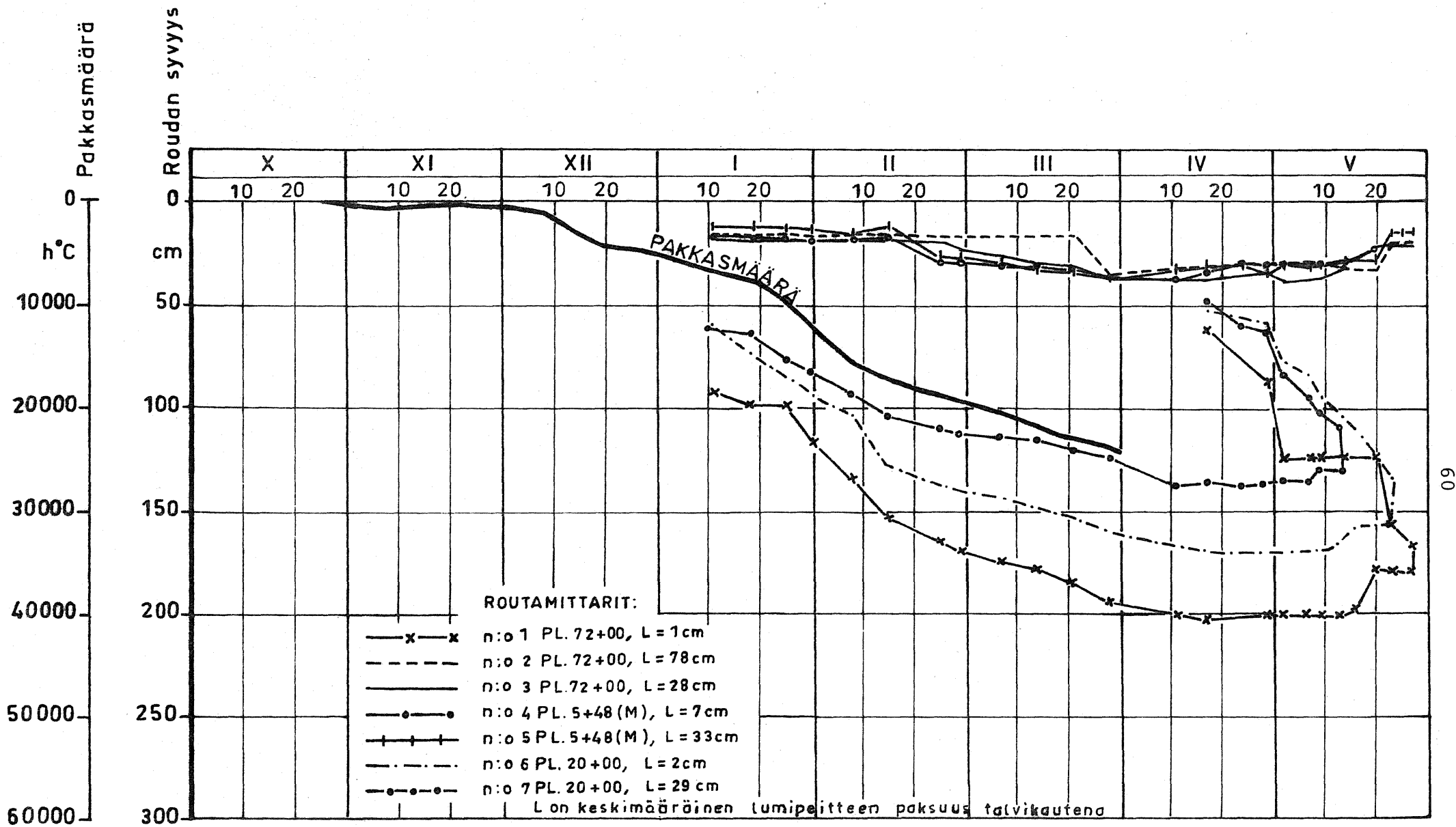
Talven pakkasmäärä vaihteli tarkkailukohteissa Etelä-Pohjanmaalla 24698-24790 h°C:een, mitä voidaan pitää hieman keskimääräistä ankarampana. Pakkasmäärän kertyminen on alkanut joulukuun alkupuolella jatkuen tasaisena maaliskuun loppuun.

Ensimmäiset roudansyvyyshavainnot tehtiin 10.1. ja havainnointia jatkettiin kunnes routa oli täysin sulanut. Kuvissa 30 a-e on esitetty ilman pakkasmäärä ja routaantumisen kehittymisen tarkailluissa padoissa.

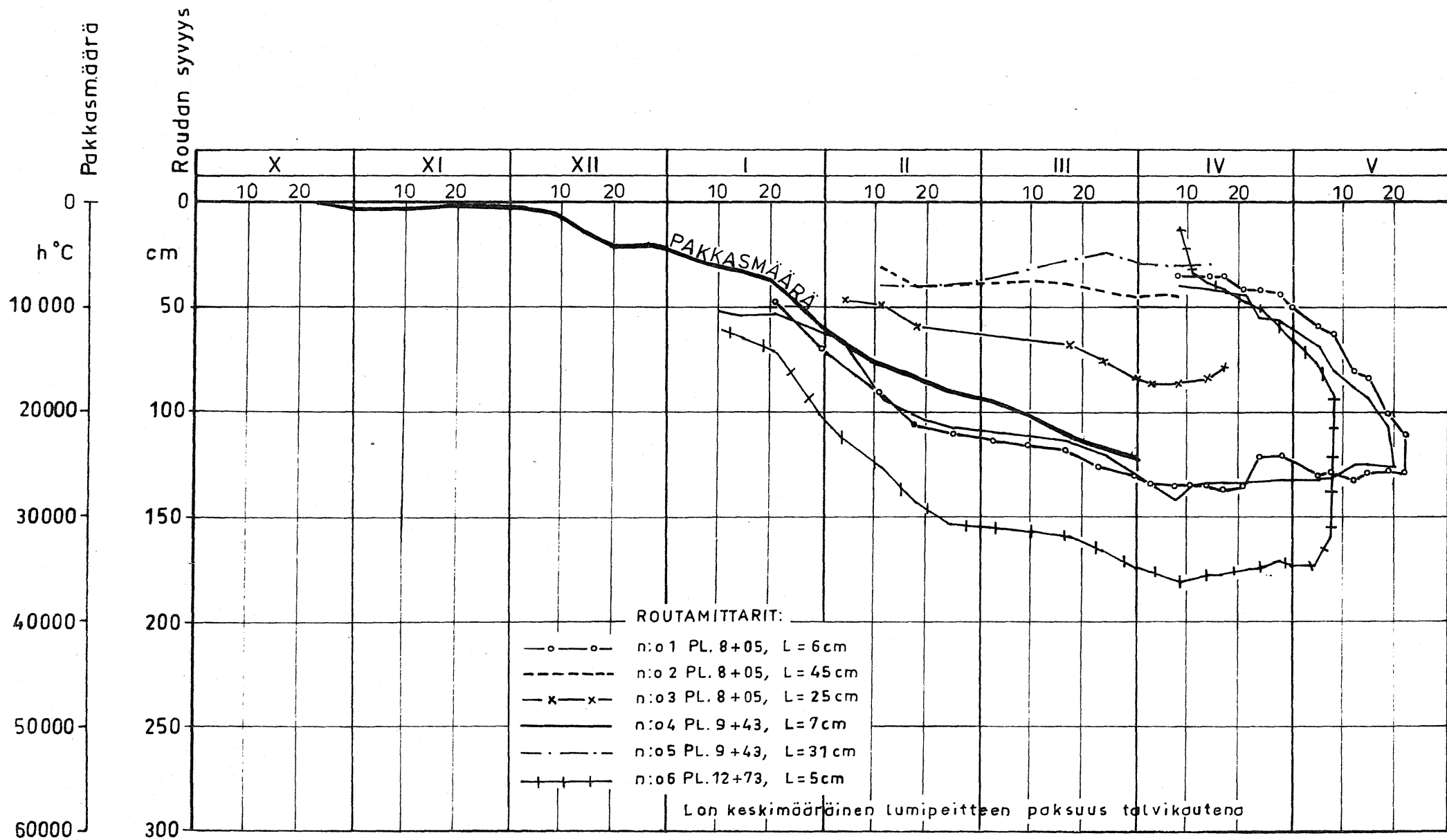
Kalajärven maapadolla oli kaiken kaikkiaan seitsemän routamittaria. Kuvasta 30 a havaitaan routaantumisen vaihtelu harjan ja luiskan välillä. Luiskista peräisin olevissa havainnoissa on selvästi esillä lumen suojaava vaikutus roudan tunkeutumisen jäädessä alkutalven lukemiin, vaikka pakkasmäärä on kertynyt lähinnä tammi-, helmi- ja maaliskuussa. Jo noin 30 cm:n keskimääräinen lumipeite on estänyt roudan kehittymisen. Luiskien paksut lumikerrokset ovat kertyneet tuulen "puhaltaessa" harjan lumen luiskiin. Harjalla on routaantuminen seurannut pakkasmäärän kehitystä vähäisen lumipeitteen takia. Roudan maksimisyvyys harjalla on vaihdellut 139 cm:stä 204 cm:iin, mikä aiheutunee lumipeitteen ja kosteuspitoisuuksien vaihtelusta. Roudan sulaminen on alkanut huhtikuun puolivälissä ja pato oli täysin sula toukokuun puolivälissä.

Kivi- ja Levalammen altaan maapadossa oli myöskin seitsemän tarkkailukohdetta, joista yhdestä ei saatu luotettavia havaintoja. Havaintokohteissa on lumipeite vaihdellut huomattavasti aiheuttaen routaantumiseen selviä eroja. Harjalla on mittarin 6 maksimilukeman 181 cm ja muiden harjalla sijaitsevien mittarien lukemien välillä eroa lähes puoli metriä. On oletettava, että mittarin 6 kohdalla on havaintokohta ollut paljas osan talvea aiheuttaen eron routaantumiseen. Luiskassa on routaantuminen ollut vähäistä lukuunottamatta mittaria 3, jonka kohdalla routa on ohuemmasta lumipeitteestä johtuen tunkeutunut 87 cm:n syvyyteen. Roudan sulaminen on alkanut 10.4. ja rakenne oli sulanut 20.5.

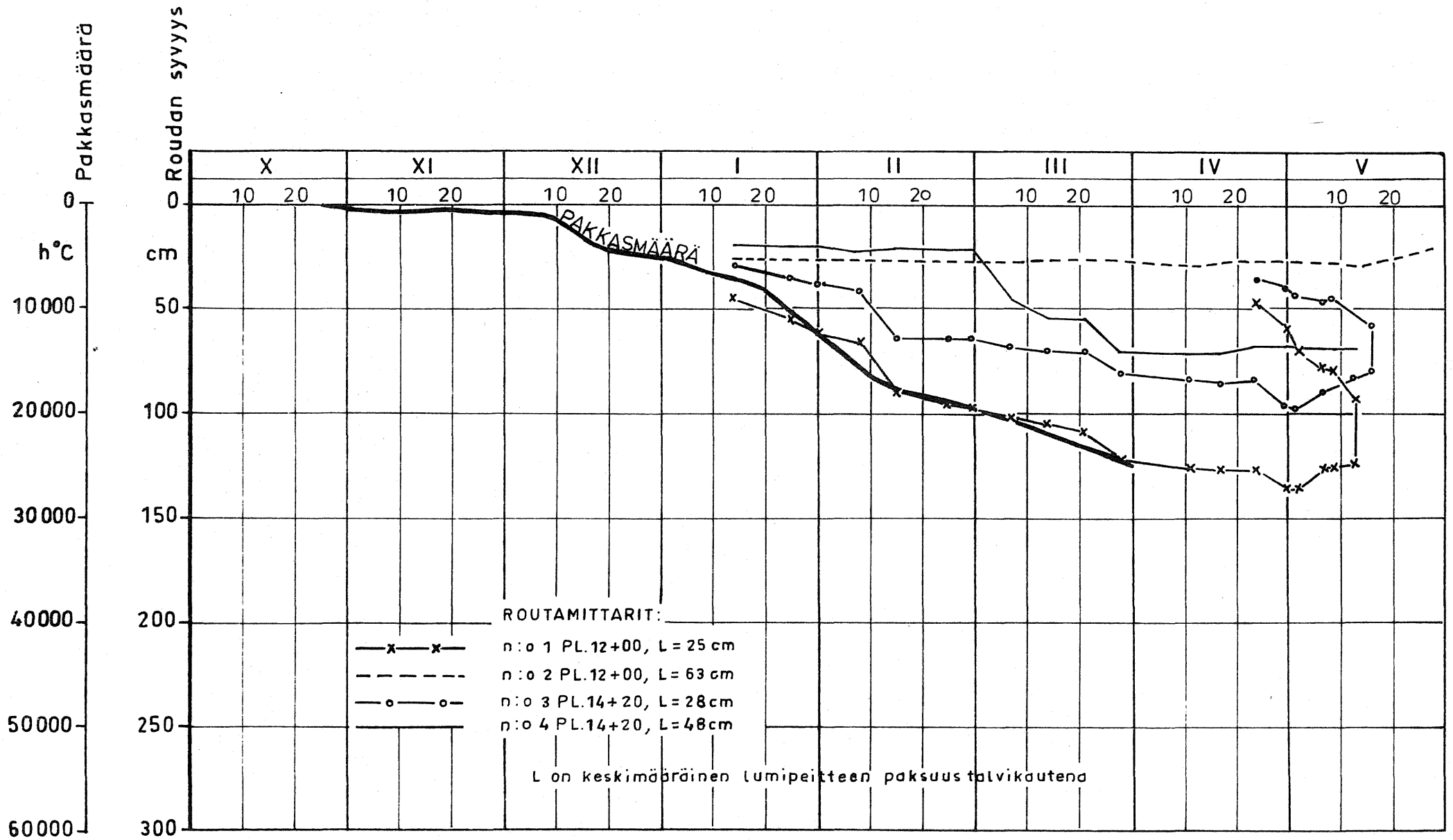
Liikapuron altaan tarkkailu alkoi tammikuun puolella välissä ja tarkkailtavana oli neljä routamittaria. Lumipeite on havaintopaikoilla ollut melko runsas johtuen padon suojaisuudesta. Padon rakenteessa on harjalla pienehköjä halkeamia,



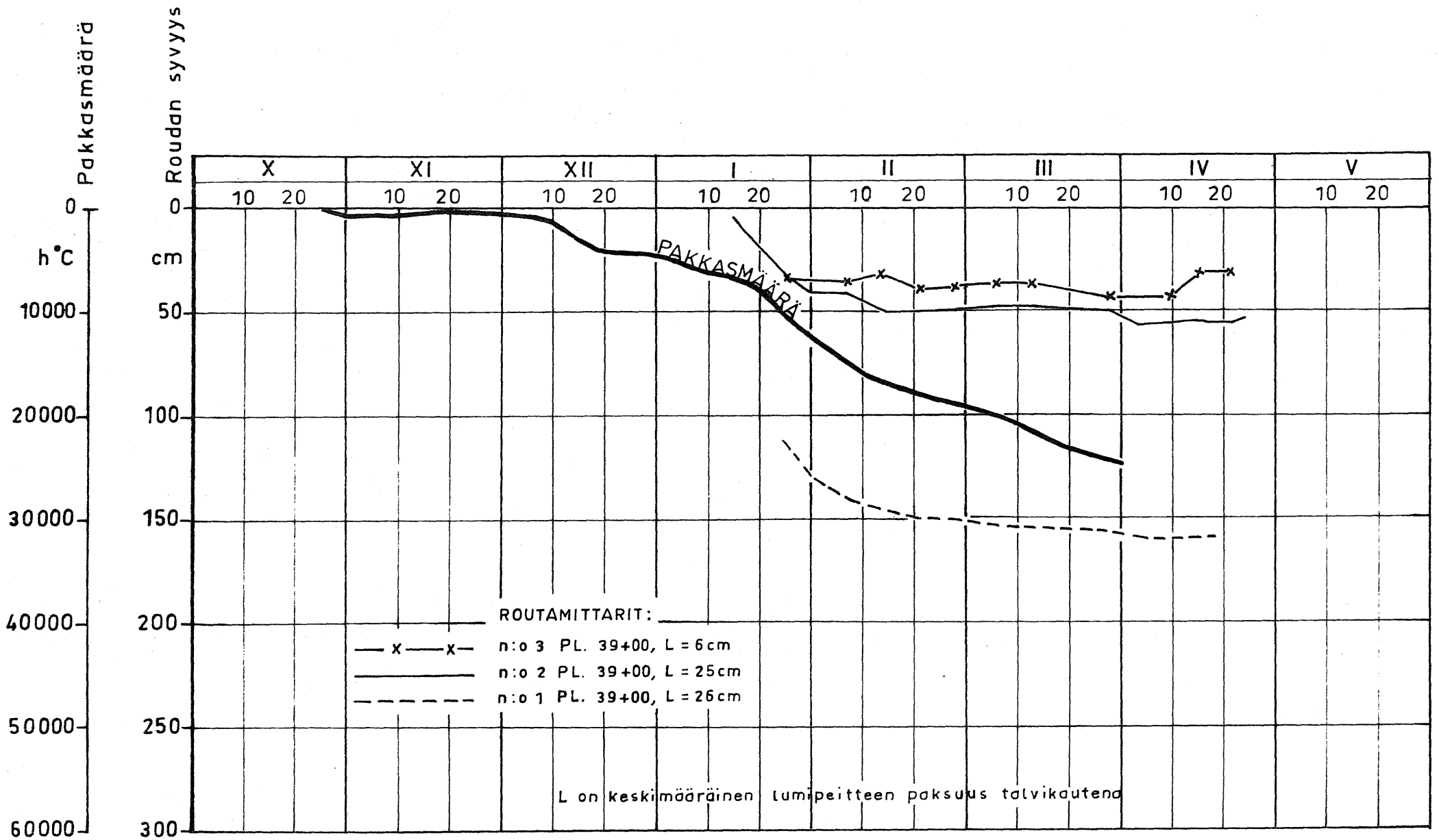
Kuva 30a. Kalajärven maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1979-1980.



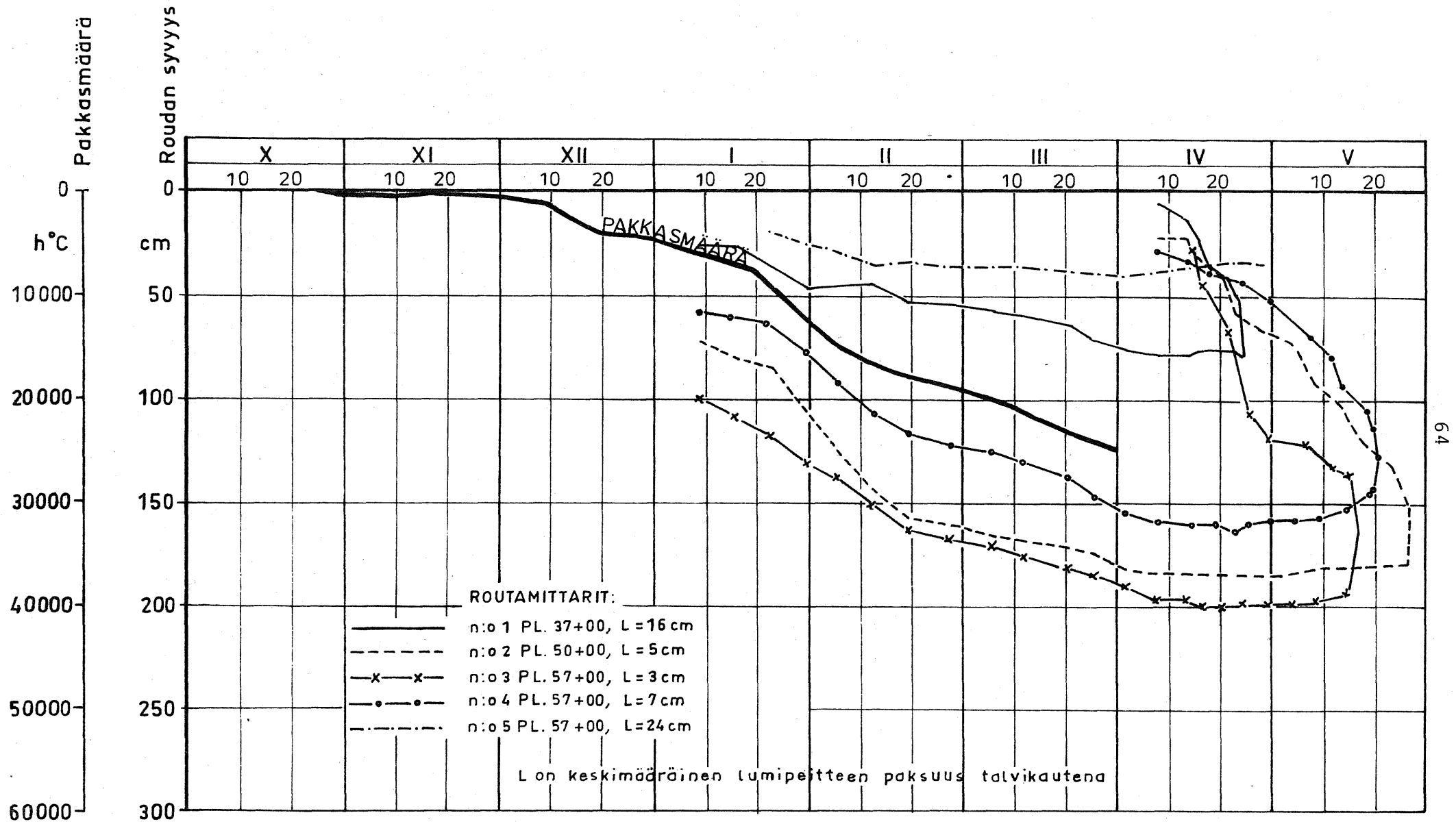
Kuva 30b. Kivi- ja Levalammen maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1979-1980.



Kuva 30c. Liikapuron maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1979-1980.



Kuva 30d. Hirvijärven maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1979-1980.



Kuva 30e. Kyrkösjärven maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1979-1980.

mitkä toisaalta lisäävät routaantumista. Liikapuron altaan vedenpinnan korkeuden vaihtelu on hyvin pientä luokkaa, ja talvella vallitseva korkea vedenpinnan taso vähentää hieman routaantumista lisäten toisaalta routimishaittoja. Roudan maksimisyvyys on ollut ainoastaan 136 cm, sillä harjallakin on ollut melko paljon lunta ( $L = 25$  cm). Padon routaantuminen on kokonaisuudessaan jäänyt vähäiseksi havaintokautena lumitilanteesta johtuen. Roudan sulaminen on alkanut verrattain myöhään, vasta huhtikuun loppupuolella, sulamisen ollessa hyvin nopeaa. Rakenne oli sulanut toukokuun puoleen väliin mennessä.

Hirvijärven maapadon routatutkimuksiin kuului ainoastaan kolme routamittaria. Padossa on kuivan puolen luiskassa 45-60 cm:n vahvuinen humusmaakerros. Turpeen routaantumista estävä vaikutus tulee selvästi esiin mittauksissa, sillä routa ei ole päässyt tunkeutumaan turvekerroksen alapuolelle. Luiskan mittauspaikoissa on ollut lunta noin 25 cm, joten turpeella on merkitystä routasuojana, mikä johtuu turpeen korkeasta vesipitoisuudesta. Harjalla on roudan syvyys havaittu ensimmäisen kerran 25.1., jolloin routa oli tunkeutunut jo 1,20 metriä paksun routimattoman kerroksen ja moreenisen tiivistesydämen rajalle. Routa on ollut lähes syvimmillään helmikuun puolella välissä, jonka jälkeen routaantumisen kehitys on ollut hyvin hidasta. Roudan syvyyden maksimiarvoksi on mitattu 160 cm. Sulamisvaiheesta ei ole Hirvijärven padolta havaintoja.

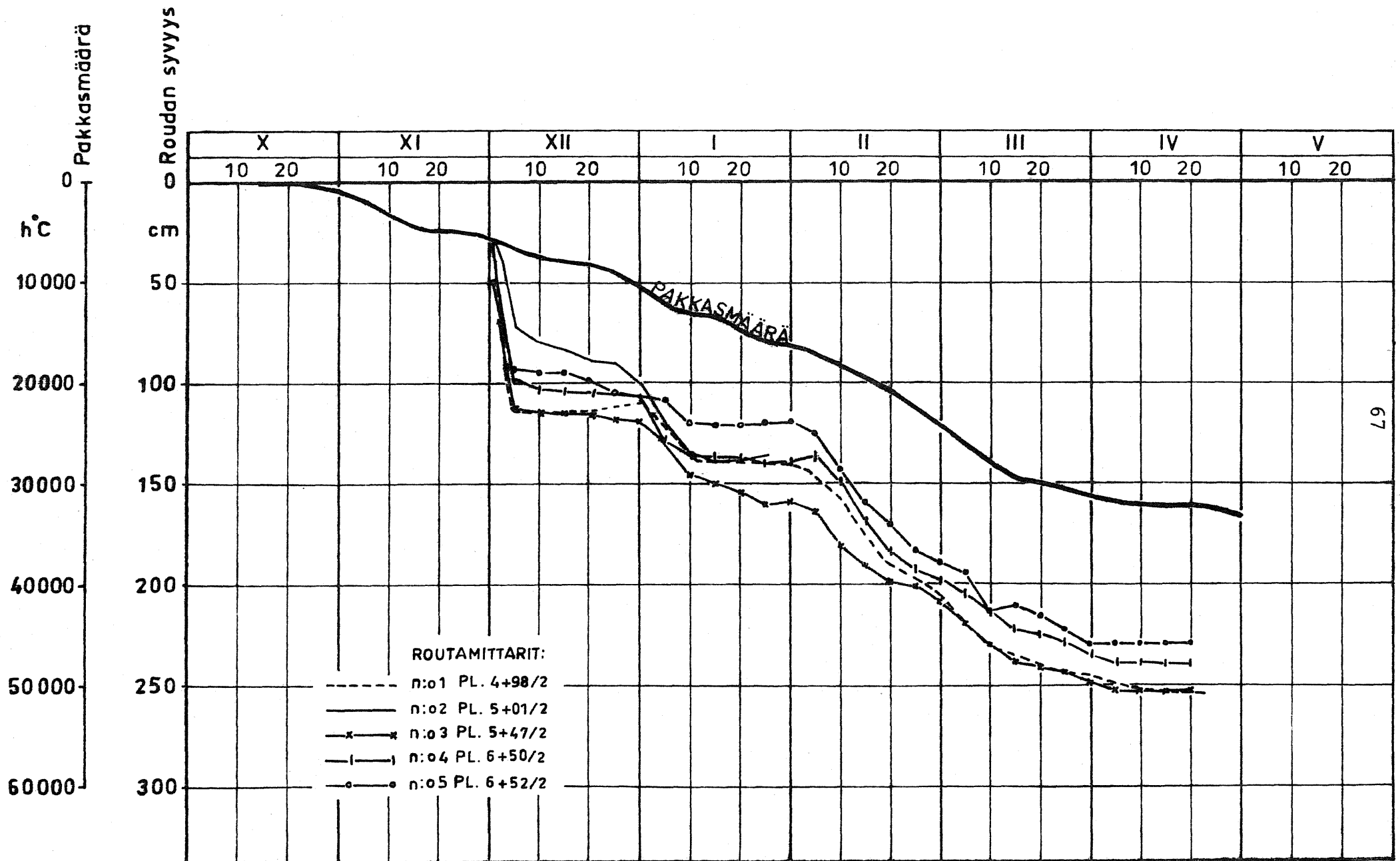
Kyrkösjärven maapadossa on rakentaminen osassa patolinjaa kesken, joten suurempien mittarijärjestelyjen teosta on luovuttu. Routatutkimukseen Kyrkösjärvellä kuului viisi mittauskohdetta, joista neljä oli sijoitettu harjalle. Kyrkösjärven rakenne on hyvin tiivistä, mikä vaikuttaa lisäävästi routaantumiseen. Toisaalta rakenteen kosteuspitoisuus on hieman korkeampi kuin muissa tutkituissa padoissa, mikä vähentää roudan tunkeutumista. Havainnoista nähdään "normaali" kehityskulku roudan seurattessa pakkasmäärän kehitys-

tä harjalla vähäisillä lumipeitteen arvoilla lukuunottamatta mittaria 1, jonne lumen kertyminen on ollut voimakkaampaa. Luiskassa on lumi pitänyt roudan syvyyden pienenä. Routaantumisen on jatkunut huhtikuulle saaden suurimman arvonsa 201 cm huhtikuun puolessa välissä. Toisaalta sulamisen on havaittu alkaneen 10.4., joten voidaan olettaa mittauksissa olevan parin senttimetrin virhe. Routa oli täysin sulanut rakenteesta toukokuun loppupuolella.

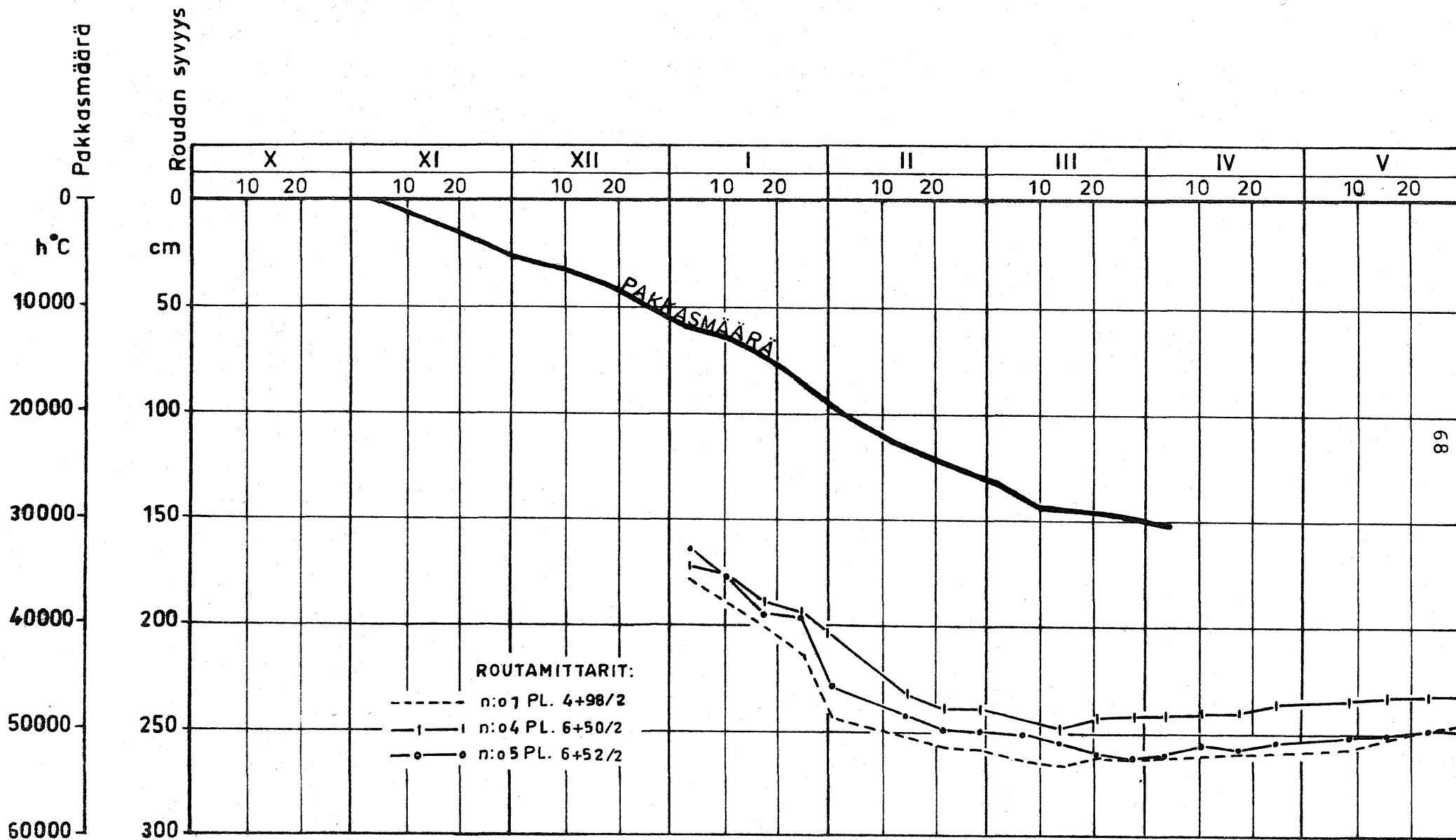
#### 5.223 Uljuan altaan Tulisaaren maapadon havainnot

Tulisaaren maapadossa on tehty routaantumishavaintoja kolmena talvikautena pyrkimyksenä selvittää tunkeutuuko routa louhosrakenteen läpi moreenista tehtyyn tiivistesydämeen. Routamittarit sijaitsivat padon harjalla eikä tutkimusohjelmaan ole sisältynyt muiden havaintojen kuten esim. lumitietojen selvittely. Routamittareita oli viisi kappaletta.

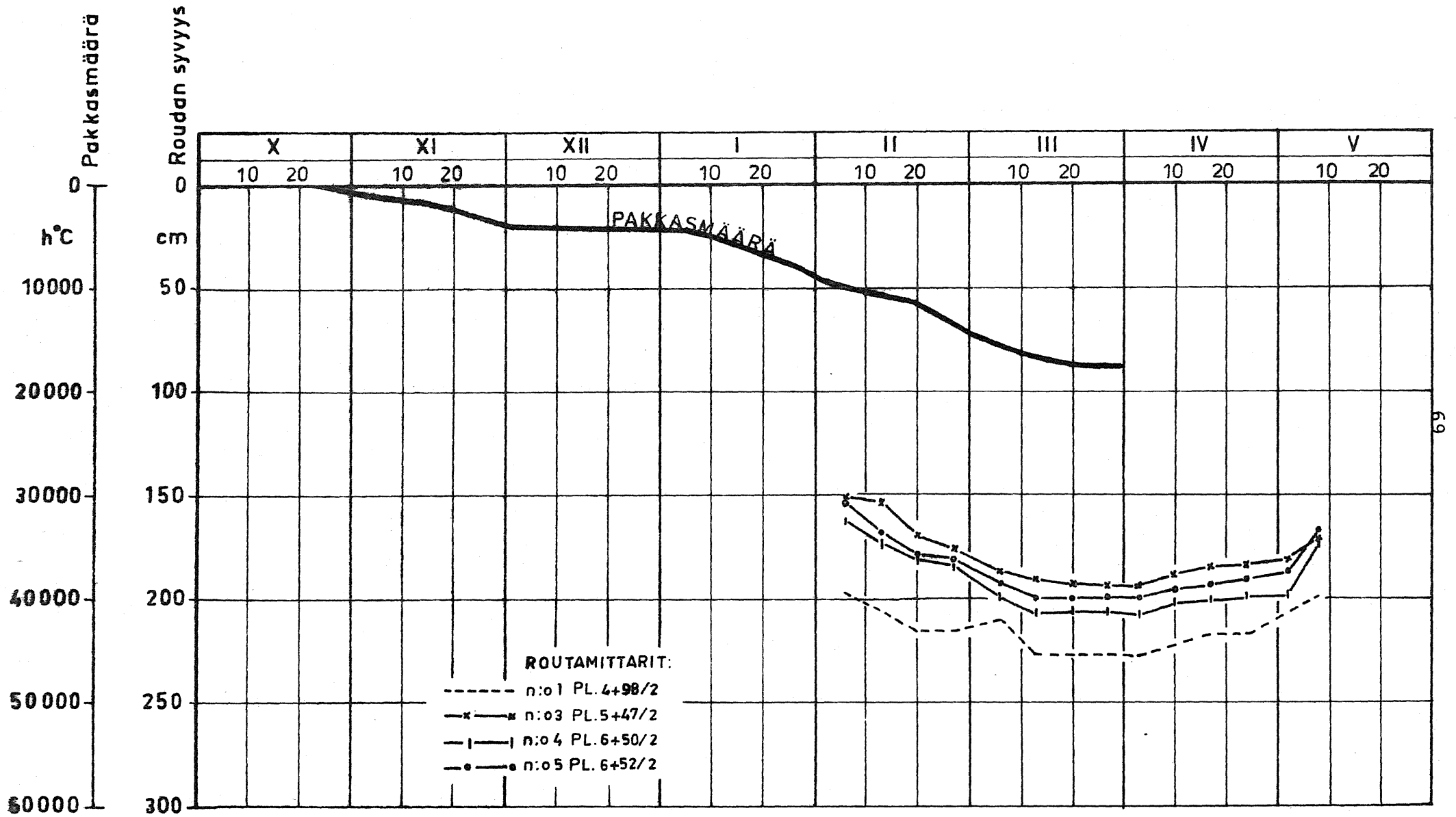
Talvella 1970-1971 oli pakkasmäärä 32470 h<sup>o</sup>C, mitä voidaan pitää hieman keskimääräistä ankarampana. Routahavainnot ja pakkasmäärä havaintokaudelta on esitetty kuvassa 31 a. Routa on kehittynyt joulukuun alussa hyvin nopeaan kehityksen laantuessa kuukauden jälkipuoliskolla, mikä luultavasti aiheutuu lumen väliaikaisesta keräytymisestä padon harjalle. Loppupalvesta routaantuminen on noudattanut pakkasmäärän kehitystä saavuttaen suurimman arvonsa 253 cm maaliskuun vaihteessa. Routaantumisarvoissa on ollut jonkin verran hajontaa (230-253 cm), mikä todennäköisesti johtuu lumipeitteen ja kosteuspitoisuuksien vaihtelusta. Padon tiivistesydämen harja on tasolla +79,60 - +79,80, ja routa on tunkeutunut tasoon +79,32. Voidaan kuitenkin todeta, että routaantumisesta ei ole suurempaa haittaa, sillä HW on tasolla +79,25.



Kuva 31a. Uljuan allas, Tulisaaren maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1970-1971.



Kuva 31b. Uijuan allas, Tulisaaressa, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1971-1972.



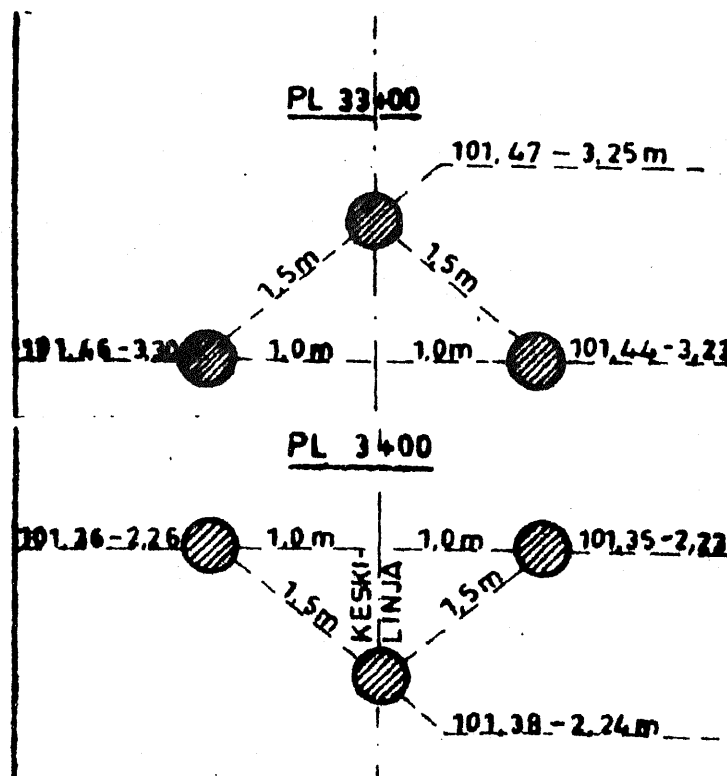
Kuva 30c. Uljuan allas, Tulisaaren maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1972-1973.

Talvikaudella 1971-1972 (kuva 31 b) pakkasmäärä oli 30487 h<sup>o</sup>C. Routamittareista oli toimintakunnossa ainoastaan kolme kappaletta. Ensimmäiset havainnot tehtiin 5.1., jolloin routaantuminen oli edennyt syvälle louhoskerrokseen. Verrattaessa havaintoarvoja edellisen talven vastaaviin arvoihin todetaan routaantumisen olleen voimakkaampaa huolimatta pienemmästä pakkasmäärästä. Lumipeitteen voidaan arvioida olleen vähäisen, mitä vahvistaa pakkasmäärä- ja routakäyrien samanmuotoisuus. Roudan syvyyden maksimiarvoksi on saatu 268 cm, mikä merkitsee että routa on tunkeutunut HW:n tason alapuolelle. On kuitenkin epätodennäköistä, että tiivistesydämeen olisi tällä tasolla aiheutunut vahinkoa. Rakenne on ollut jäässä kesäkuuhun saakka.

Talvi 1972-1973 on ollut harvinaisen leuto pakkasmäärän jäädessä 17460 h<sup>o</sup>C:een. Routaantuminen on kuitenkin ollut hyvin voimakasta suurimman roudan syvyyshavainnon ollessa peräti 229 cm. Tästä voidaan päätellä louhoskerroksen vesipitoisuuden olleen kyseisenä aikana hyvin alhaisen, mikä on vähentänyt louhoskerroksen jäätyislämpöä. Havaintoja on saatu neljästä routamittarista maksimiarvojen vaihdellessa 195-229 cm:n välillä. Sulaminen on tapahtunut toukokuun alkupuolella. Havainnoista voidaan todeta, ettei louhosmateriaali ole hyvä routasuoja johtuen louhoksen alhaisen vesipitoisuuden aiheuttamasta pienestä jäätyislämmöstä ja siten pienestä "routavastuksesta".

#### 5.224 Hautaperän altaan maapadon havainnot

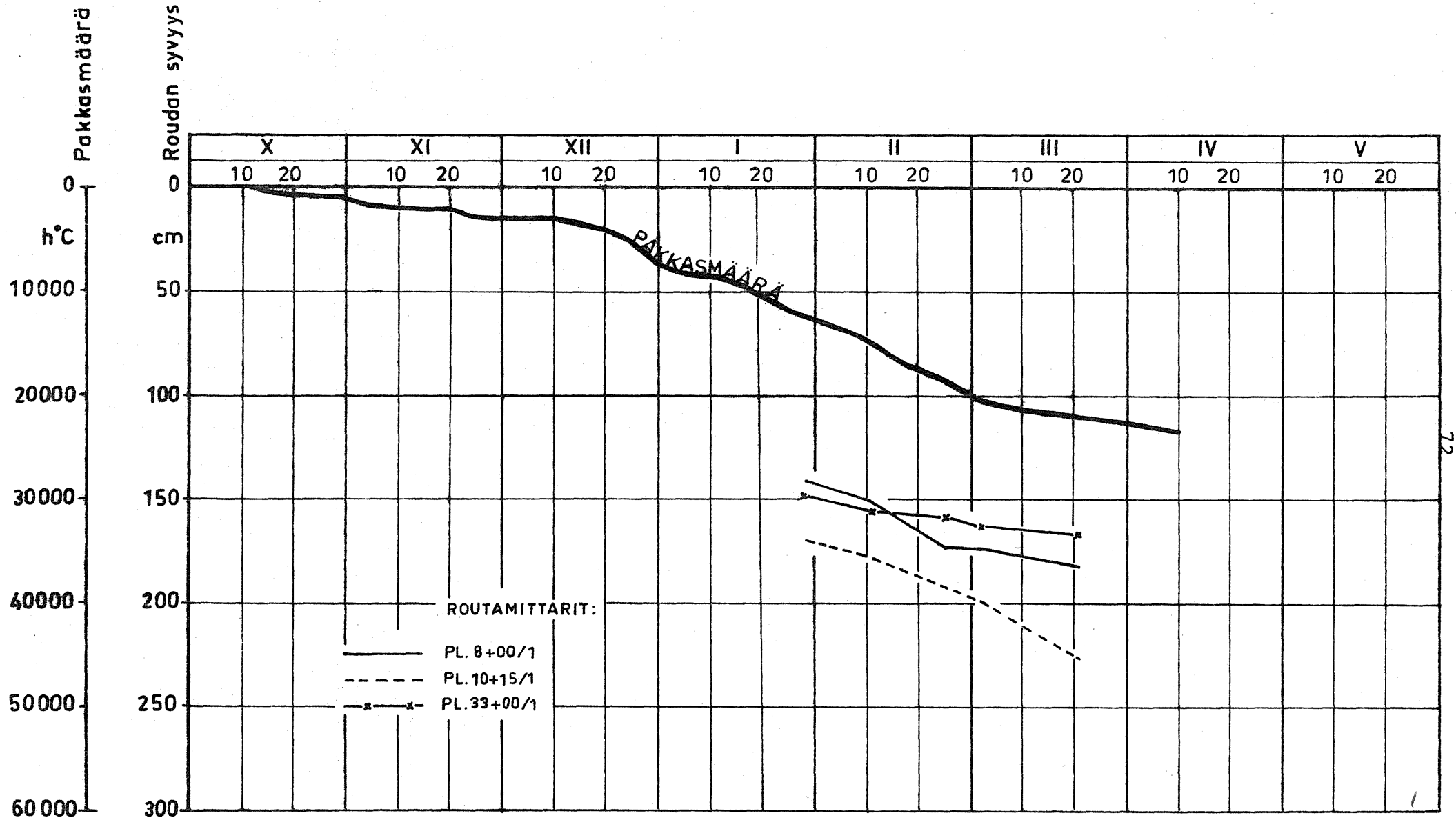
Hautaperän maapadossa mitattiin roudan syvyyksiä kolmena talvena. Talvella 1975-1976 roudan syvyys mitattiin kaivamalla patoa auki. Mittaus suoritettiin 22.-23.4.1976 ja roudan syvyyksiksi saatiin tällöin kuvan 32 lukemat.



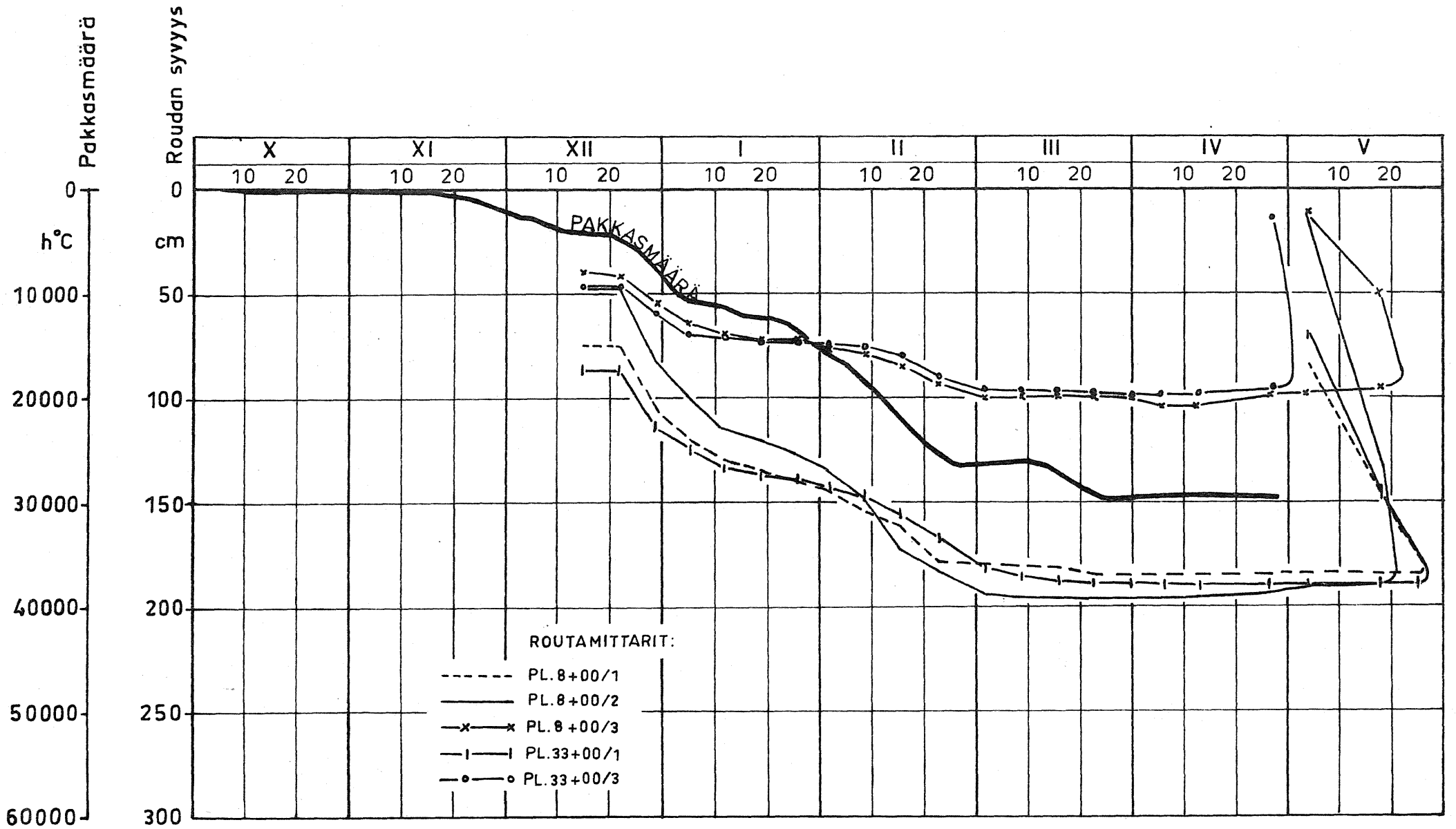
Kuva 32. Roudan syvyydet Hautaperän maapadossa 22.-23.4.1976.

Lukemista on huomioitava, että roudan syvyydet ovat lukemia padon teoreettisen poikkileikkauksen pinnasta. Kyseisenä talvena rakenteesta kuitenkin puuttui soraverhous harjalta, joten roudan syvyydet ovat todellisuudessa pienempiä. Routa on kuitenkin tunkeutunut tasoon +98,46 eli huomattavasti HW-tason +99,75 alapuolelle. Täten routiminen on saattanut olla osasyynä kesällä 1976 tapahtuneeseen sortumaan (Maijala 1978).

Talvella 1976-1977 oli pakkasmäärä alueella 23724 h<sup>o</sup>C. Kaudelta on havaintoja kolmen routamittarin osalta ajanjaksolta 1.2.-20.3.1977. Routaantumishavainnot noudattavat tältä osin pakkasmäärän kehitystä ja havaintokauden maksimilukemaksi on saatu 227 cm, mitä voidaan pitää melko suurena arvona pakkasmäärään nähden. Kuvassa 33 a on esitetty routahavainnot ja pakkasmäärä kyseiseltä havaintokaudelta.



Kuva 33a. Hautaperän maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1976-1977.



Kuva 33b. Hautaperän maapato, routahavainnot ja pakkasmäärä talvella 1977-1978.

Talvikauden 1977-1978 pakkasmäärä oli 29851 h<sup>o</sup>C talven ollessa huomattavasti keskimääräistä ankarampi. Kuvaan 33 b on piirretty havaintokauden aikana viidestä routamittarista saadut arvot sekä pakkasmäärä. Routaantuminen on padon harjalla noudattanut pakkasmäärään kehittymistä saavuttaen maksimiarvonsa 198 cm maaliskuun alkupuolella. Routaantumissyvyyttä voidaan pitää pakkasmäärään nähden alhaisena. Puutuvista lumitiedoista johtuen voidaan ainoastaan arvioida harjalla olleen lumipeitteen vähentäneen routaantumista. Lumen suojaava merkitys nähdään jälleen selvästi kuivassa luiskassa, missä roudan syvyys on jäänyt alle metrin.

Hautaperän maapadon havainnot ei pidetty riittävinä tarkempaan analyysiin.

#### 5.23 Tilastollinen tarkastelu

Maapatojen routaantumista tutkittiin tilastollisesti havaintoaineiston perusteella. Tilastollinen tarkastelu on jaettu kahteen ryhmään havaintojen ja patorakenteen mukaan.

Aluksi tarkasteltiin talven 1979-1980 havainnot Vaasan vesipiirin alueella sijaitsevilla padoilla, jotka kaikki olivat rakenteeltaan homogeenisiä moreenipatoja. Havaintokohteita oli kaiken kaikkiaan 26 kpl. Havaintoaineistoa tutkittaessa päädyttiin luomaan regressiomalli roudan syvyyden ja keskimääräisen lumipeitteen perusteella määritetyn maanpinnan pakkasmäärän välille. Mallia, jossa roudan syvyys riippuisi ilman pakkasmäärästä ja talven keskimääräisestä lumipeitteestä, ei pidetty kelvollisena pakkasmäärätietojen pienen hajonnan takia. Taulukossa 11 (s. 56) on esitetty havaintokauden maanpinnan pakkasmäärät ja kuvaan 34 on piirretty maanpinnan pakkasmäärän F\* ja roudan yhteys.

Regressiokäyrä sovitettiin vesihallituksen käytössä olevan "Epälineaarisen käyränsovitushjelman" /15/ avulla tutkinnalla muotoa  $\xi = aF^*{}^b$  olevaa mallia. Mallissa a ja b ovat vakioita. Parhaiten saatiin tutkimusaineistoa kuvaamaan malli (28):

$$\xi = 0,00688 \cdot F^{*0,996} \quad (28)$$

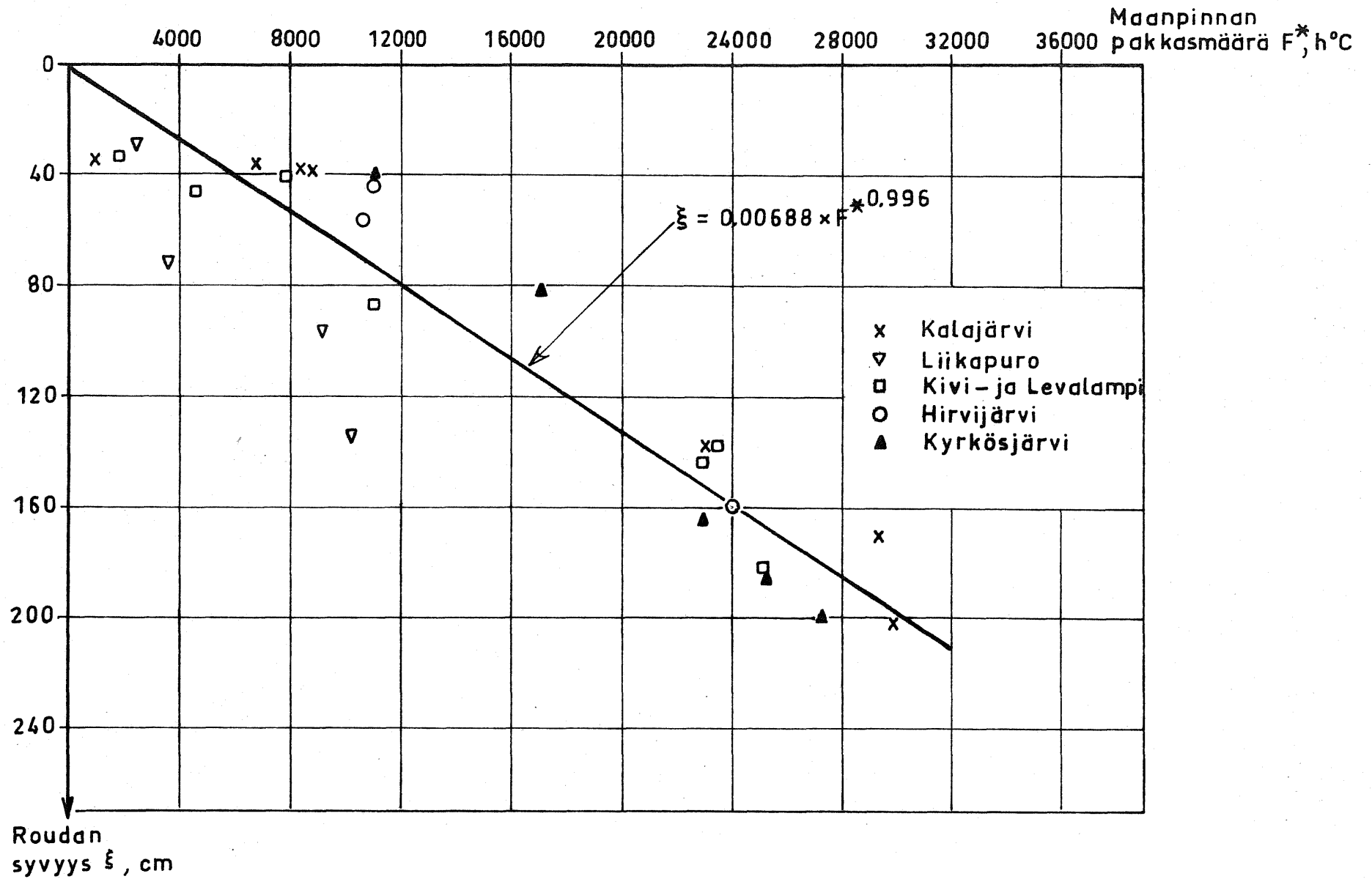
Regressiokäyrä (28) on esitetty kuvassa 34.

Seuraavaksi tutkittiin samaa muotoa olevan regressiokäyrän sopivuutta roudan syvyyden ja ilman pakkasmäärän välille Tulisaaren maapadon havaintoihin. Lumipeitteen paksuudesta havaintokaudella ei ole tietoa, mutta lumipeite oletettiin merkityksettömäksi, koska routamittarit sijaitsivat padon harjalla. Havaintokausia on ollut kolme ja havaintoja kaiken kaikkiaan 11 kpl. Havainnoille on saatu malli (29):

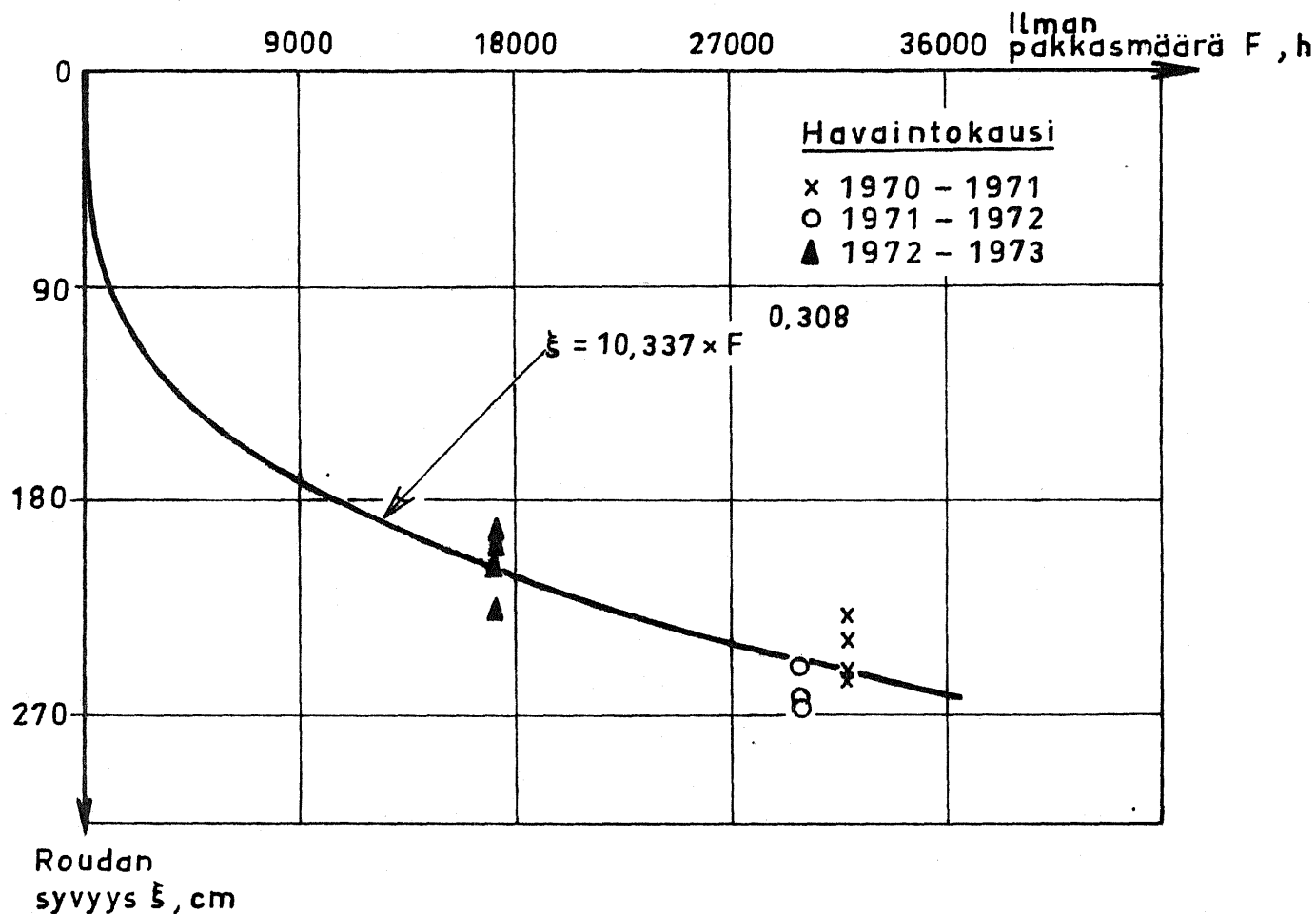
$$\xi = 10,337 \cdot F^{*0,308} \quad (29)$$

Havainnot ja regressiokäyrä on esitetty kuvassa 35.

Verrattaessa havaintoja keskenään on huomioitava, että  $F^* = 1,25 \cdot F$  lumettomissa olosuhteissa. Havaintojen pohjalta nähdään kuitenkin selkeä eroavaisuus homogeenisen moreeni-maapadon ja louhosrakenteisen padon routaantumisessa. Esimerkiksi talven 79-80 pakkasmäärällä ( $F \approx 24000 \text{ h}^{\circ}\text{C}$ ,  $F^* = 30000 \text{ h}^{\circ}\text{C}$ ) saadaan käyrien perusteella routaantumisyydyksi homogeenisessä moreenimaapadossa noin 2 metriä ja louhosrakenteessa 2,30 metriä. Tässä erossa tulee näkyviin louhosrakenteen alhaisen vesipitoisuuden merkitys.



Kuva 34. Roudan syvyyden  $\xi$  ja maanpinnan pakkasmäärän  $F^*$  välinen riippuvuus talven 1979-1980 havaintojen mukaan.



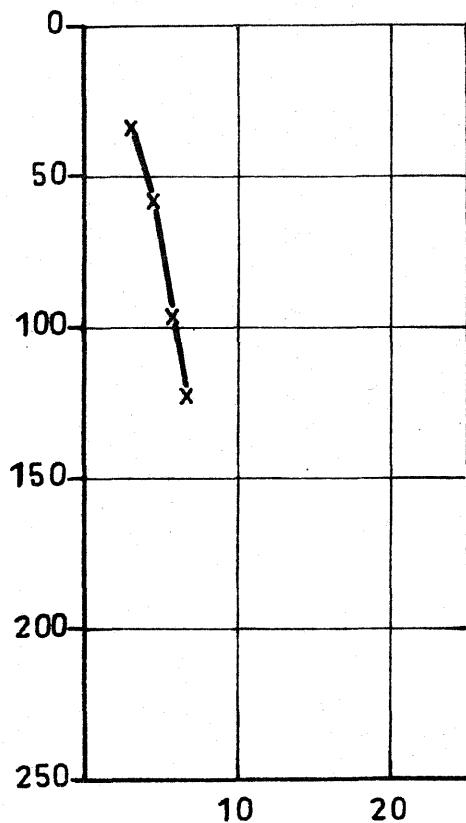
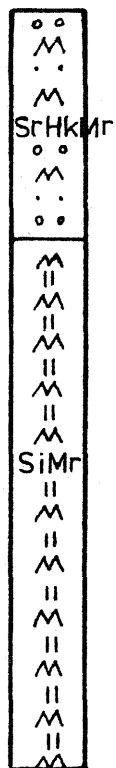
Kuva 35. Ilman pakkasmäärän F ja roudan syvyyden  $\xi$  välinen riippuvaisuus Tulisaaren maapadossa 1970-1973.

## 5.24 Roudan syvyyden teoreettinen laskenta

### 5.241 Kosteuspitoisuusmääritykset

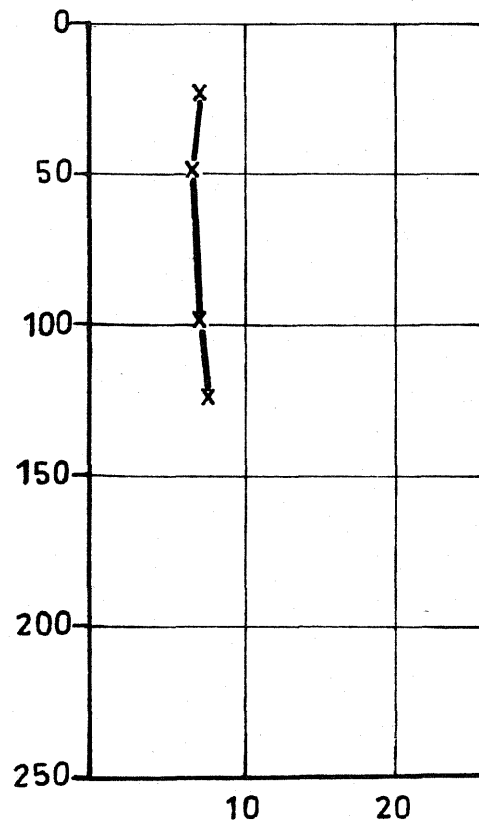
Routaantumisen teoreettista tarkastelua varten suoritettiin kesäkuussa 1980 tietyissä tutkimuskohteissa näytteenotto kosteuspitoisuuksien määrittämiseksi. Näytteet otettiin padon pintaosista routamittarien kohdilta. Kuvissa 36 a-d on esitetty kosteuspitoisuusmääritysten tulokset ja näytteenotto-paikoilla vallitsevat maalajirajat.

Routamittari  
1  
syvyys  
padon pinnasta (cm)



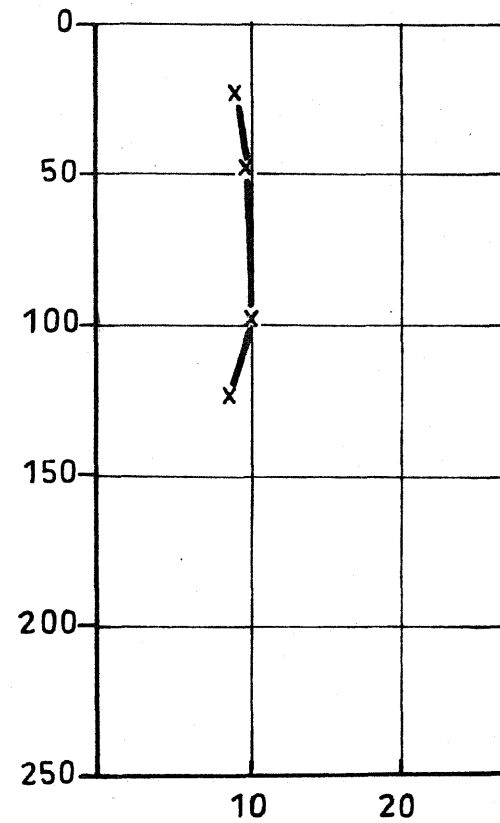
p-%  
vesipitoisuus

Routamittari  
2  
syvyys  
padon pinnasta (cm)



p-%  
vesipitoisuus

Routamittari  
3  
syvyys  
padon pinnasta (cm)



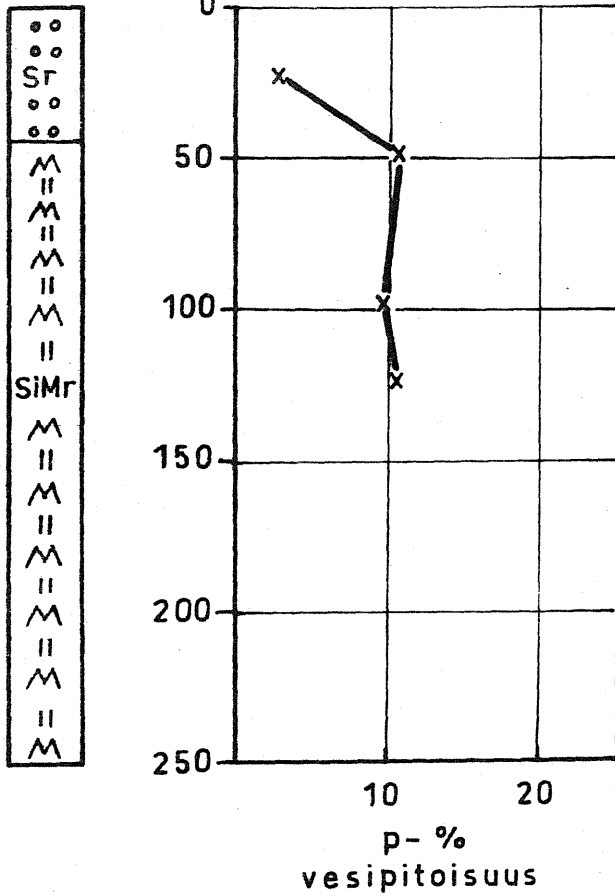
p-%  
vesipitoisuus

Kuva 36a. Kalajärven altaan maapato pl. 72+00. Vesipitoisuusmääritykset ja maalajirajat.

Routamittari

1

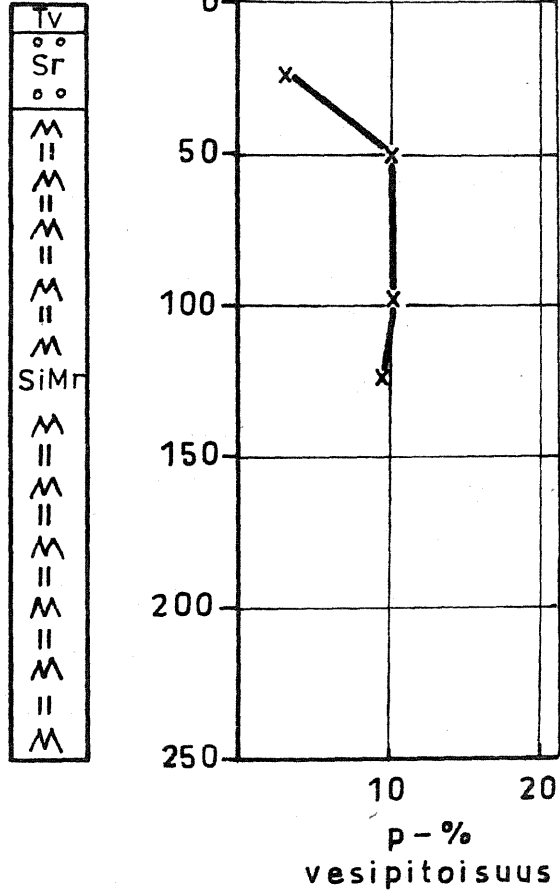
syvyys  
padon pinnasta (cm)



Routamittari

2

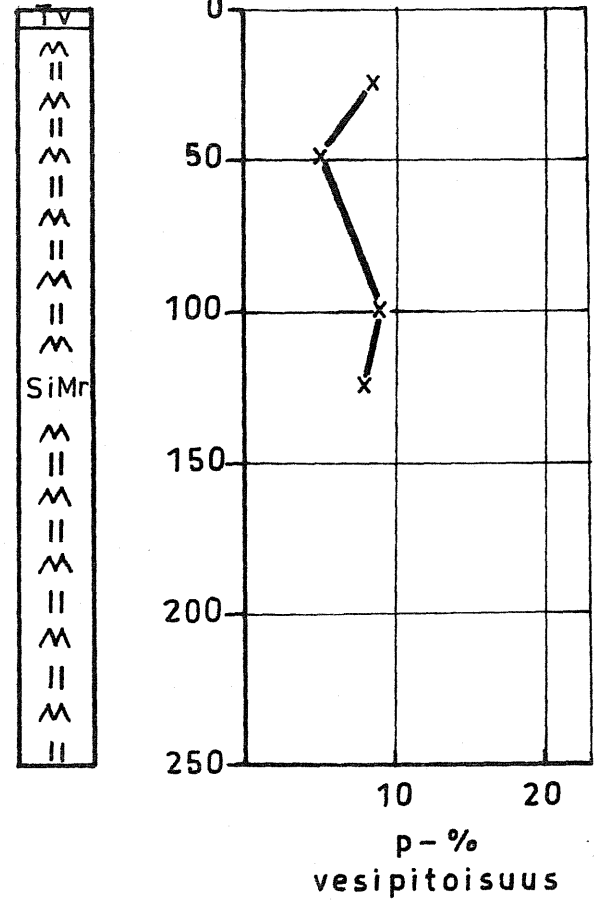
syvyys  
padon pinnasta (cm)



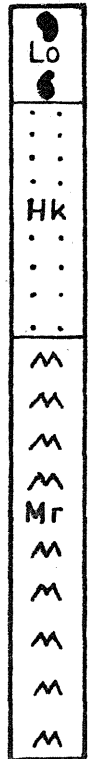
Routamittari

3

syvyys  
padon pinnasta (cm)



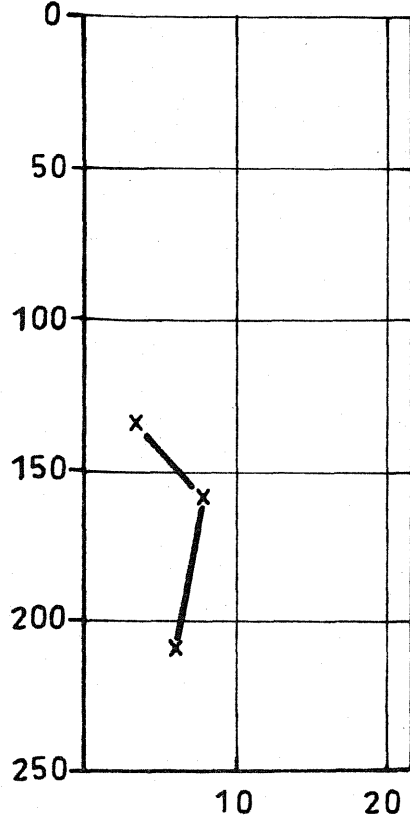
36b. Kivi- ja Levalammen altaan maapato pl. 8+05. Vesipitoisuusmääritykset ja maalajirajat.



Routamittari

1

syvyys  
padon pinnasta (cm)



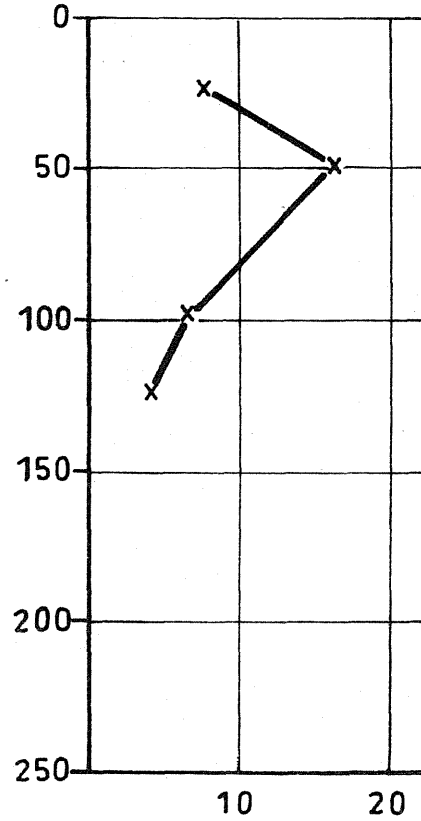
p-%  
vesipitoisuus



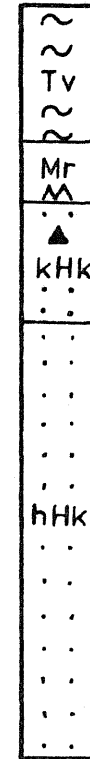
Routamittari

2

syvyys  
padon pinnasta (cm)



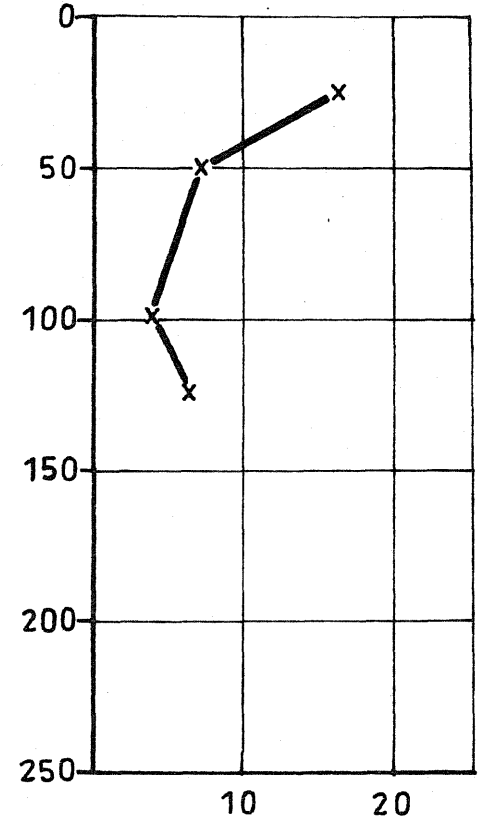
p-%  
vesipitoisuus



Routamittari

3

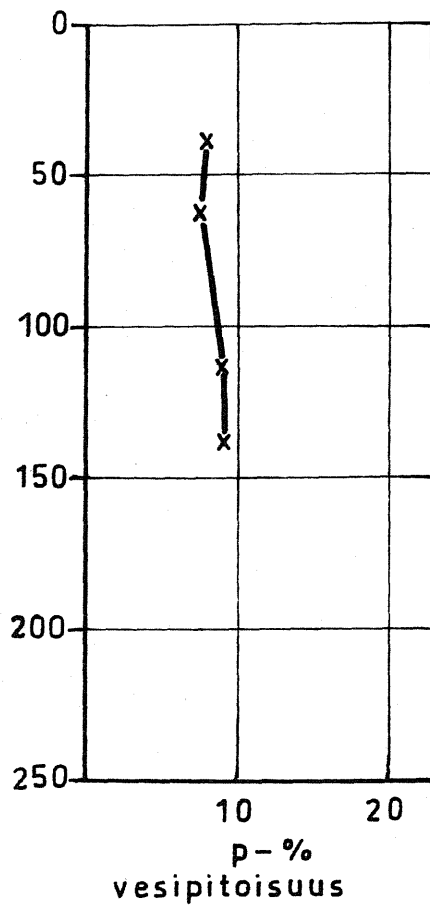
syvyys  
padon pinnasta (cm)



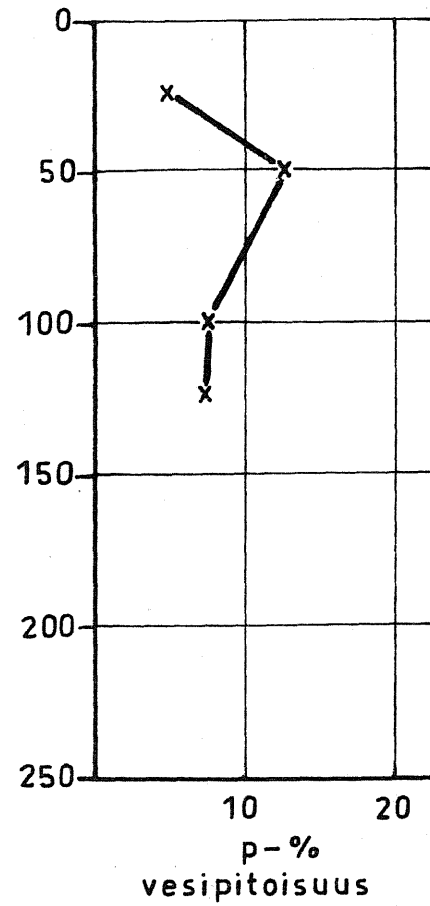
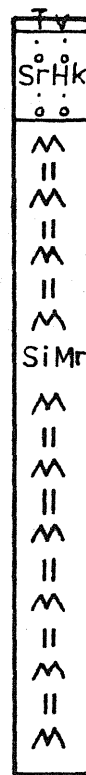
p-%  
vesipitoisuus

36c. Hirvijärven altaan maapato pl. 39+00. Vesipitoisuusmääritykset ja maalajirajat.

Routamittari  
1  
syvyys  
padon pinnasta (cm)



Routamittari  
2  
syvyys  
padon pinnasta (cm)



32d. Liikapuron altaan maapato pl. 18+00. Vesipitoisuusmääritykset ja maalajirajat.

Verrattaessa tutkimustuloksia rakennusaikaisiin arvoihin havaitaan, että esim. Kalajärven maapadossa on rakennusaikainen vesipitoisuus ollut keskimäärin 8-10 % ja nyt suoritettujen määritysten tulokset ovat samaa luokkaa. Padon harjalla näyttää kuitenkin tapahtuneen kuivumista parin prosenttiyksikön verran. Hirvijärven maapadossa on myöskin rakennusaikainen vesipitoisuus ollut 8-10 %:n luokkaa, kun taas tässä rakenteessa on havaittavissa moreenissa kauttaaltaan kuivumista. Ero Kalajärven ja Hirvijärven rakenteiden välillä johtuu rakenteiden iästä. Laajempien johtopäätösten teko rakenteiden kuivumisesta ei ole tämän aiheiston pohjalta perusteltavissa. Saatuja kosteuspitoisuustietoja on käytetty roudan syvyyden teoreettisessa laskennassa.

#### 5.242 Roudan syvyyden laskeminen

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään myös teoreettisen laskennan käyttökelpoisuutta routaantumisen analysoinnissa. Laskennassa käytettiin ns. parannettua Watzingerin menetelmää.

Ilmastotiedoista lähtötietoina tarvitaan pakkasmäärä, jona käytetään talven keskimääräisen lumipeitteen mukaan arvioitua maanpinnan pakkasmäärää  $F^*$ . Lisäksi on tunnettava maan rakenteellisista ominaisuuksista vesipitoisuus ja tilavuuspaino. Laskennassa on käytetty vesipitoisuusarvoina yleensä em. näytteenoton tuloksia siten, että kullekin rakennekerokselle vesipitoisuusarvo on laskettu määritysten keskiarvona. Tilavuuspainoiksi on oletettu kullekin materiaalille tiiviysasteessa  $D = 90\%$  vallitsevat keskimääräiset arvot. Esimerkiksi moreenille on käytetty kuivatilavuuspainoa  $\gamma_d = 21 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$  ja soralle  $\gamma_d = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$ . Rakennetietojen perusteella on ratkaistu materiaalin lämmönjohtavuusarvot Johansenin käyrästä (kpl. 2.421). Seuraavassa on esitetty esimerkki laskelman kulusta:

Esimerkki ns. parannetusta Watzingerin menetelmästä:

- Laskentakohde: Kalajärven maapato, pl. 72+00/1
- Rakennekerrokset: Kerros A, materiaali srHkMr, jonka paksuus  $Z_A = 0,75$  m.  
Kerroksen A alta alkaa silttinen moreeni, josta käytetään symbolia B.
- Rakenneominaisuudet:  $W_A = 4,5 \%$ ,  $\gamma_d = 21 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$   
 $W_B = 6,5 \%$ ,  $\gamma_d = 21 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
- Ilmastotiedot:  $L = 1 \text{ cm} \Rightarrow F^* = 1,20 \cdot 24090 = 28908 \text{ h}^\circ\text{C}$
- Kerrosten lämmönjohtavuudet:

$$\underline{A} \quad 1-n = \frac{\gamma_d}{\gamma_k} = 0,78, \text{ missä } \gamma_k \text{ on maarakeiden ominaispaino } \approx 27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$S_r = \frac{w\gamma_d}{n\gamma_w} = \frac{0,045 \cdot 21}{0,22 \cdot 10} = 0,43 \quad \text{Sulassa tilassa}$$

$$\frac{0,045 \cdot 21}{0,22 \cdot 9,2} = 0,47 \quad \text{Jäätäneenä}$$

Johansenin käyrästöistä:  $\lambda_{Aj} = 2,10 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$   
 $\lambda_{As} = 2,45 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$

Alaindekseista j viittaa jäätäneeseen ja s sulaan tilaan.

$$\underline{B} \quad 1-n = 0,78$$

$$S_r = \begin{matrix} 0,62 & \text{Sulassa tilassa} \\ 0,67 & \text{Jäätäneenä} \end{matrix}$$

$$\lambda_{Bj} = 2,80 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\lambda_{Bs} = 2,52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

- Kerrosten jäätymislämmöt:

$$q_A^* = w_A (1-x_s) \cdot \gamma_d \cdot i = 7812 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3}$$

$$q_B^* = 0,065(1-0) \cdot 2100 \cdot 93 = 12695 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3}$$

$x_s$  on jäätymättömän veden osuus, oletetaan kaiken veden jäätyvän ( $x_s = 0$ )

$i$  on veden jäätymislämpö =  $93 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$

- Kerrosten "pakkasvastukset":

$$A = q_A^* \cdot z_A \cdot \frac{z_A}{2\lambda_{Aj}} = 7812 \cdot 0,75 \cdot \frac{0,75}{2 \cdot 2,10} = 1046 \text{ h}^\circ\text{C}$$

$$B = q_B^* \cdot z_B \cdot \left( \frac{z_B}{2\lambda_{Bj}} + \frac{z_A}{\lambda_{Aj}} \right) = 4534 z + 2267 z^2$$

- "Maalämpö":

$$E = 0,7 \cdot \lambda_{s_{\text{kesk.}}} \cdot g \cdot t \cdot \left( \frac{z_A}{\lambda_{Aj}} + \frac{z_B}{\lambda_{Bj}} \right)$$

$$= 0,7 \cdot 2,49 \cdot 3,1 \cdot 3700 \cdot \left( \frac{0,75}{2,1} + \frac{z}{2,8} \right)$$

$$= 9520 + 7140 z$$

$\lambda_s$  on kerrosten keskimääräinen lämmönjohtavuus sulassa tilassa.

Lämpötilagradientti  $g$  ja pakkaskauden pituus  $t$  määritetään kappaleessa 2.54 esitetyistä käyrästä.

- Roudan tunkeutuminen:

$$F^* = \Omega_A + \Omega_B + E$$

$$\Rightarrow 28908 = 1046 + 4534 z + 2267 z^2 + 9520 + 7140 z$$

$$\Rightarrow 2267 z^2 + 11674 z - 18342 = 0$$

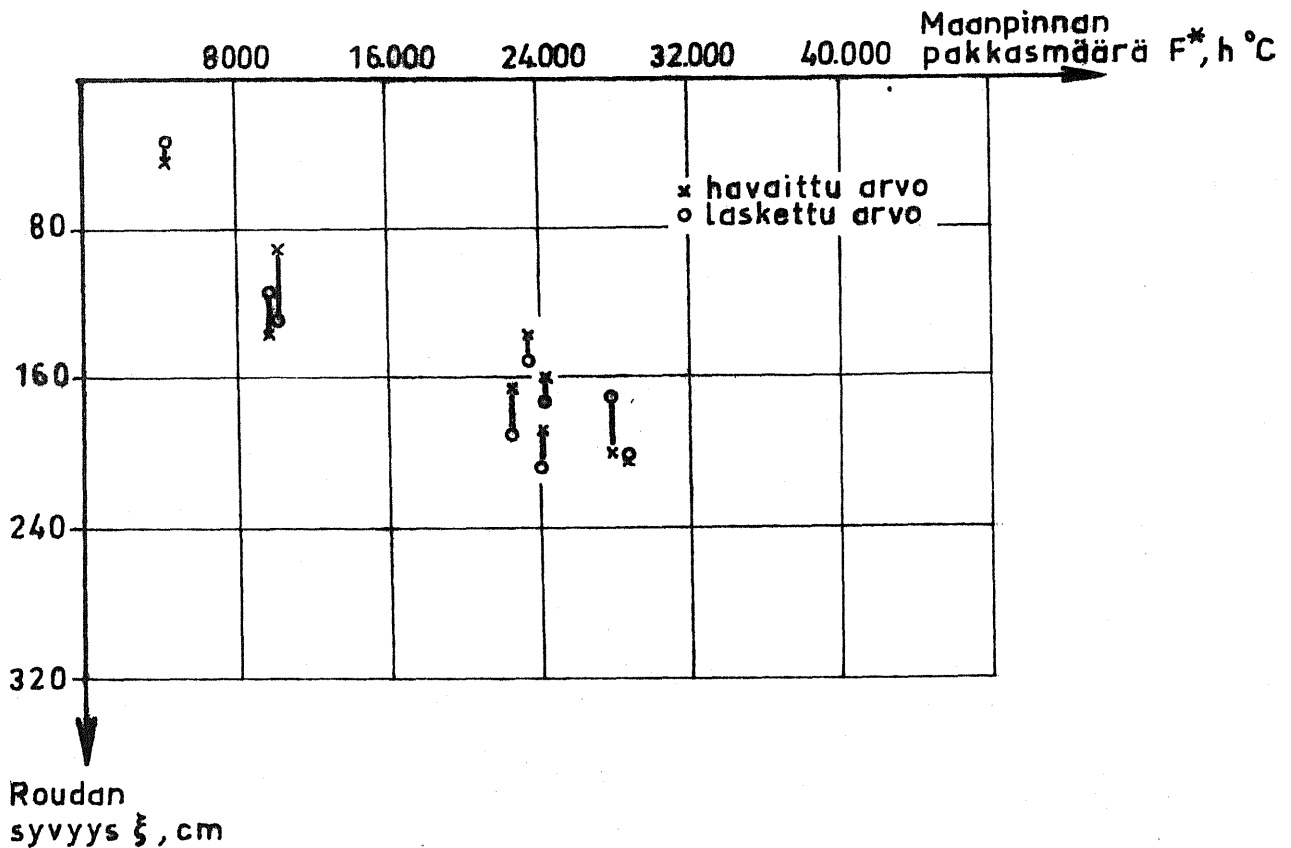
$$\Rightarrow z = 1,26 \text{ m}$$

Roudan syvyys  $\xi = z_A + z_B = 0,75 + 1,26 = \underline{\underline{2,01}}$

Kyseisellä paikalla havaittu roudan syvyys  $\xi_{\text{hav.}} = \underline{\underline{\underline{2,04 \text{ m}}}}$

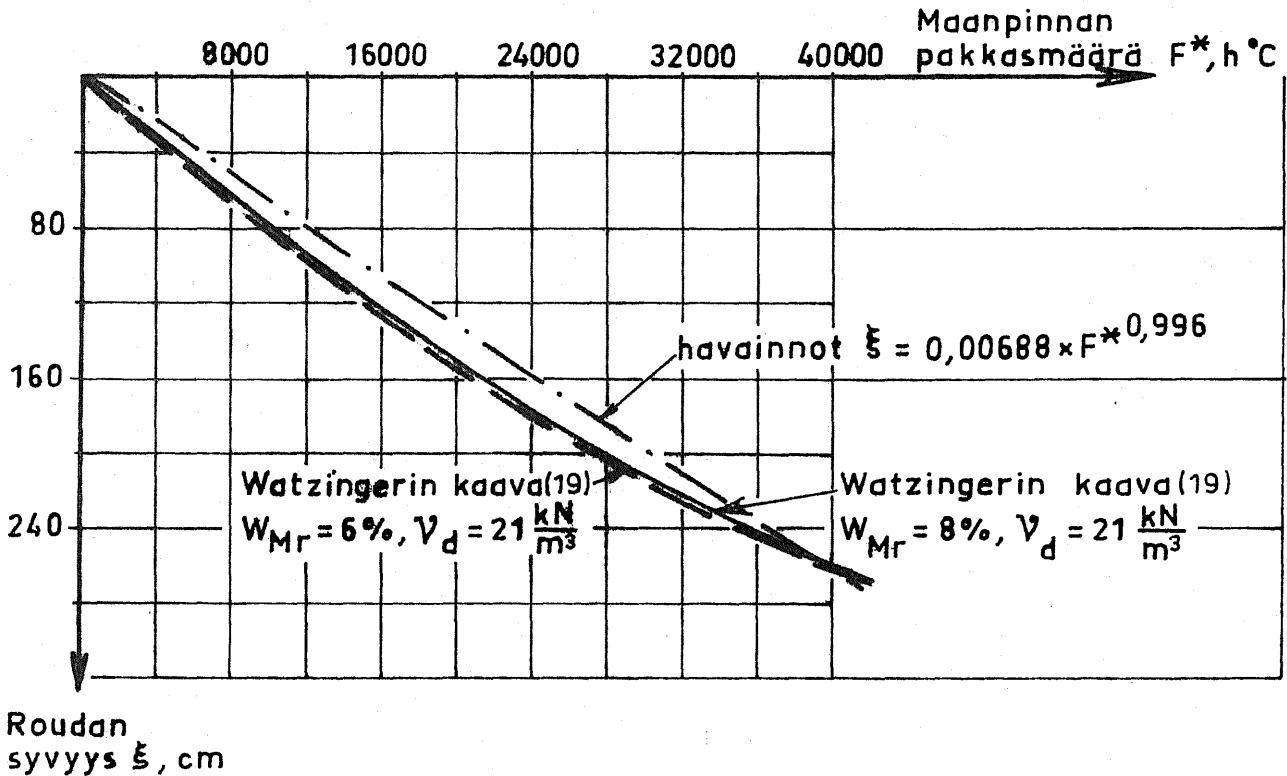
Laskelmaan liittyy huomattavia virhemahdollisuuksia. Ensimmäisenä virhettä aiheuttavana tekijänä voidaan pitää pakkasmäärän arvioimista, sillä keskimääräisen lumipeitteen paksuuden perusteella tapahtuva maanpinnan pakkasmäärän määrittäminen on hyvin likimääräinen. Toisaalta suunnittelussa ei yleensä huomioida lumipeitteen vaikutusta, joten tämä virhelähde jää pois. Laskelmassa on edelleen tehty eräitä yksinkertaistuksia, kuten muutoslämmön oletaminen pelkänsi veden jäätyislämmöksi sekä oletus kaiken veden jäätymisestä. Näistä olettamuksista ei kuitenkaan aiheutune merkittävää virhettä. Suurimmat virhemahdollisuudet sisältyvät maan

lämmönjohtavuusarvojen määrittämiseen, sillä esim. Johansenin käyrästöjen virhe on 20 %:n luokkaa. Virhemahdollisuuksia lisää edelleen kosteuspitoisuuden arvioinnista syntyvä virhe, kosteuspitoisuuden vaihdellessa ilmastollisten olosuhteiden mukaan. Myöskin lämpötilagradientin arvioiminen on epätarkkaa ja esim. maapadoissa gradientti saattaa poiketa kappaleessa 2.54 esitetystä arvoista.



Kuva 37. Laskettuja ja havaittuja roudan syvyyksiä havaintokaudelta 1979-1980.

Kuvassa 37 on esitetty eräiden Watzingerin menetelmällä suoritettujen laskelmien ja havaintojen välinen yhteys. Tutkimus osoittaa kuvan 37 mukaan, että em. virhelähteet osittain kompensoivat toisiaan kokonaisvirheen pysyessä kohtuullisissa rajoissa ( $\approx 20-30\%$ ). Täten ns. parannettu Watzingerin menetelmä antaa riittävän tarkkuuden erilaisten maarakenteiden analysointiin.

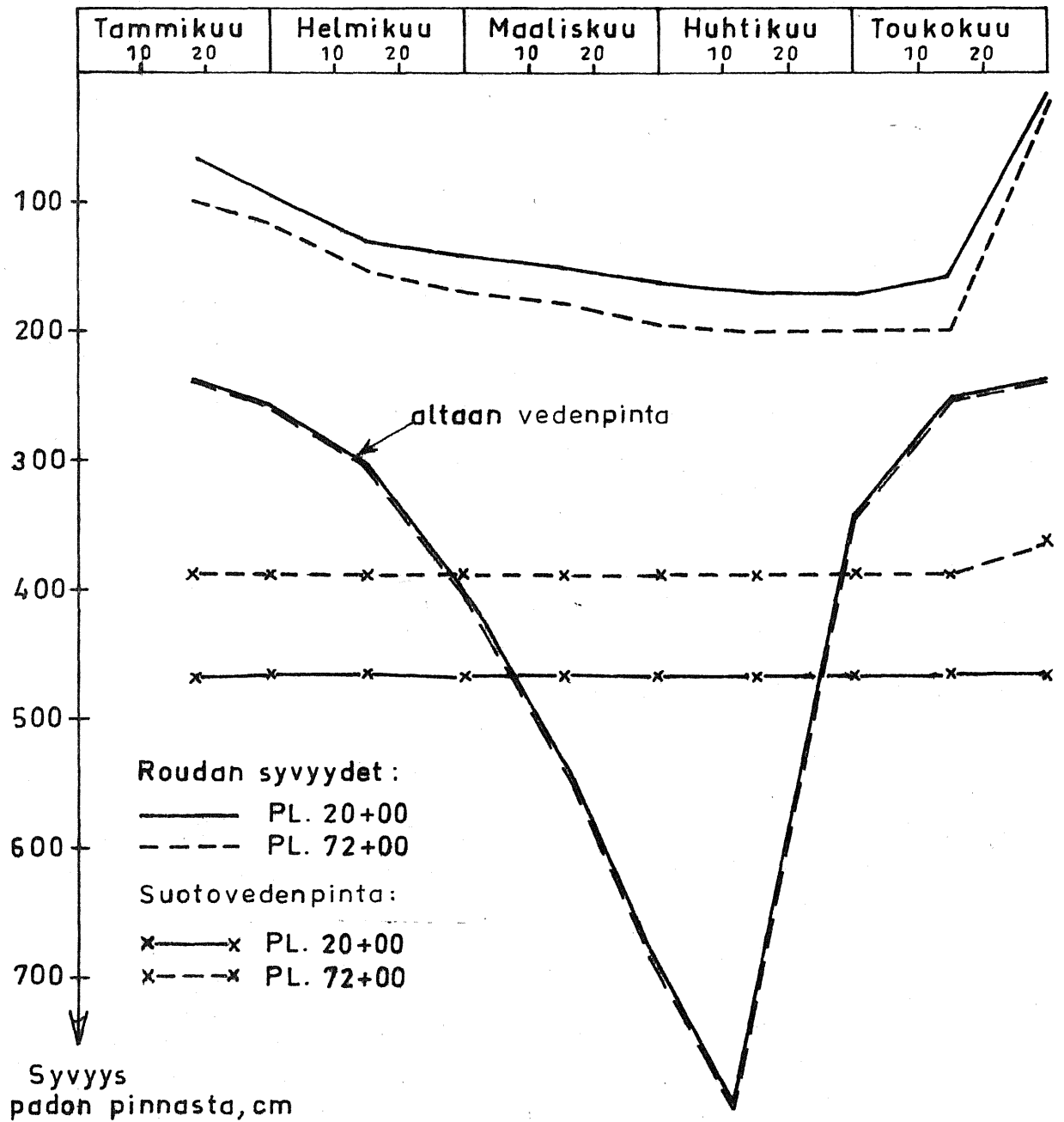


Kuva 38. Havaintojen ja Watzingerin menetelmän vertailu.

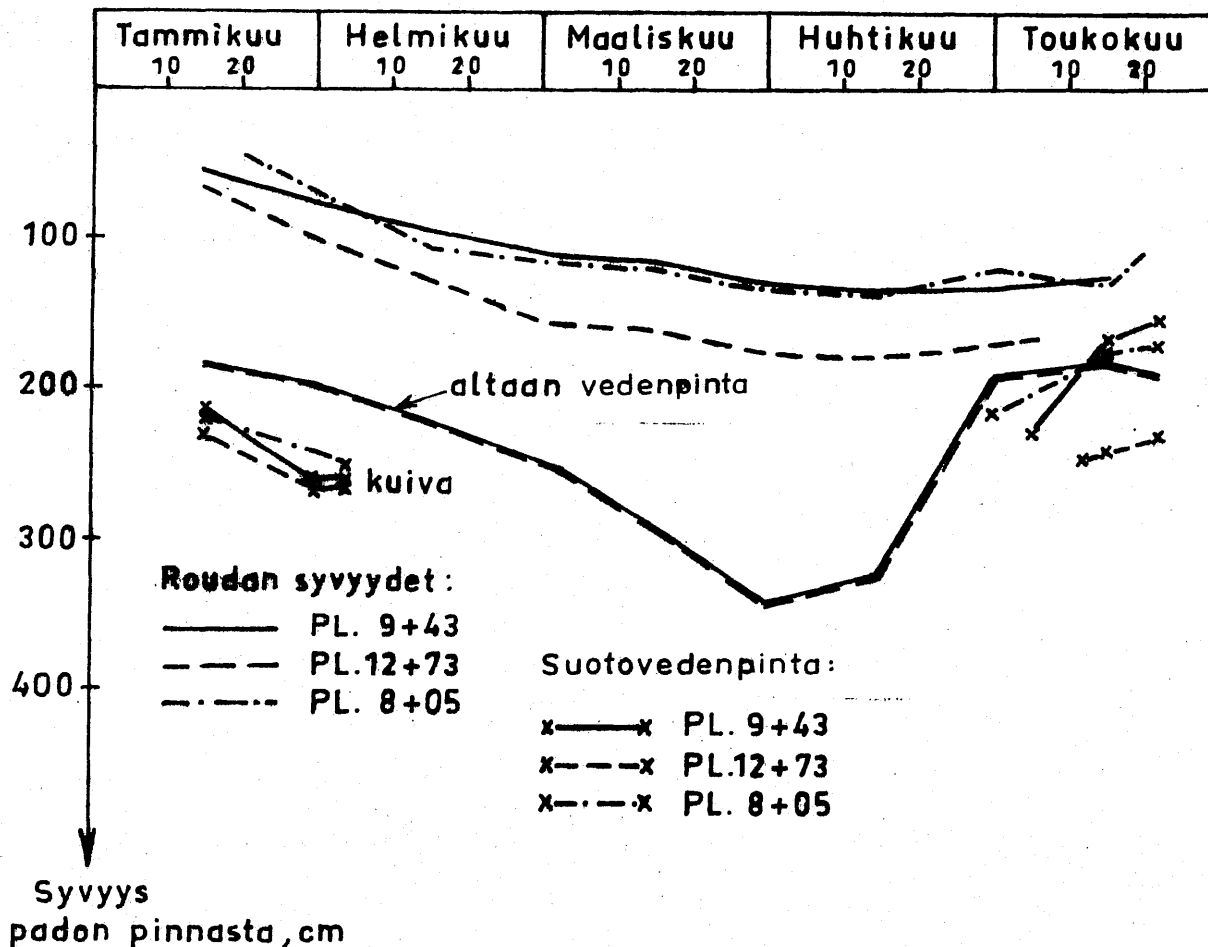
Kuvassa 38 on esitetty Watzingerin menetelmällä laskettu routaantumisen rakenteessa, jossa on 0,5 metrin sorakerros ja sen alla moreenia. Lisäksi kuvassa 38 on esitetty havaintokäyrä (28). Verrattaessa eri kosteuspitoisuuksilla laskettuja käyriä havaintokäyrään, todetaan Watzingerin menetelmän antamien arvojen olevan hieman varmemmalla puolella. Ero johtunee altaan lämmittävästä vaikutuksesta.

#### 5.25 Suotovedenpinnan mittaukset

Routatutkimusohjelmaan kuului myös suotovedenpinnan tarkkailu. Havainnot on tehty patojen harjoilla sijaisevien routamittarien kohdilta. Tarkoituksena oli tutkia suotovedenpinnan vaikutusta routaantumiseen sekä routimisen vaikutusta suotovedenpintaan. Kuviin 39 ja 40 on piirretty roudan syvyydet, suotovedenpinnan korkeustaso sekä altaan vedenkorkeus Kalajärven ja Kivi- ja Levalammen maapadoissa tutkimusaikana.



Kuva 39. Roudan syvyys, suotovedenpinta ja altaan vedenpinnan korkeus Kalajärven maapadossa tutkimus-  
aikana.



Kuva 40. Roudan syvyys, suotovedenpinta ja altaan vedenpinnan korkeus Kivi- ja Levalammen maapadossa tutkimusaikana.

Havainnoista voidaan todeta, että Kalajärven maapadossa suotovedenpinta on pysynyt alhaisella tasolla ja vakiona koko havaintokauden. Alhainen vedenpinta on saattanut lisätä padon routaantumista. Kivi- ja Levalammella altaan vedenpinta ja suotovedenpinta ovat pysytelleet suhteellisen korkealla, ja roudan tunkeutuminen rakenteeseen on jäänyt hieman vähäisemmäksi kuin Kalajärven padossa. Keväällä on havaittavissa suotovedenpinnan nousu poikkeuksellisen korkealle tasolle, mikä saattaa johtua sulamisvesien pääsystä mittausputkiin. Kokonaisuutena havainnot eivät anna syytä minkäänlaisiin johtopäätöksiin vedenpinnan vaikutuksesta routaantumiseen ja routimiseen.

## 5.3 ROUTIMISANALYYSI

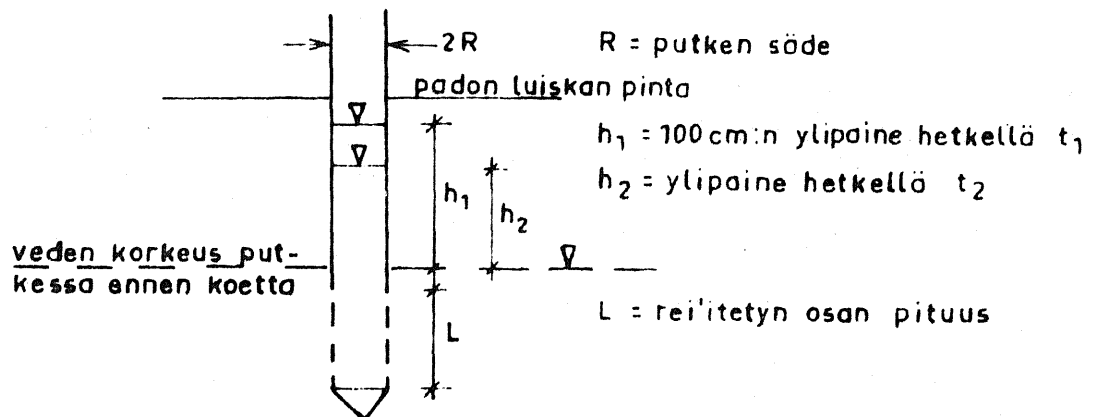
Routimisanalyysi on rajoittunut patojen vedenläpäisevyyksien ja eroosiomahdollisuuksien tutkimiseen. Vedenläpäisevyystilanteen selvittämistä varten on vuoden 1979 kesällä suoritettu kenttävedenläpäisevyyskokeita Kivi- ja Levalammen, Kalajärven, Liikapuron ja Hirvijärven maapadoissa. Lisäksi on kesällä 1980 tehty lisätutkimuksia Kalajärven maapadossa ja analysoitu suotovirtaustilanteen muutosta.

## 5.31 V e d e n l ä p ä i s e v y y s k o k e e t

## 5.311 Koemenetelmä

Cedergren /3/ on esittänyt erilaisia menetelmiä vedenläpäisevyyškertoimen määrittämistä varten. Tämän tutkimuksen kokeet suoritettiin mittausputkessa tapahtuvaan ylipaineen muutokseen perustuen.

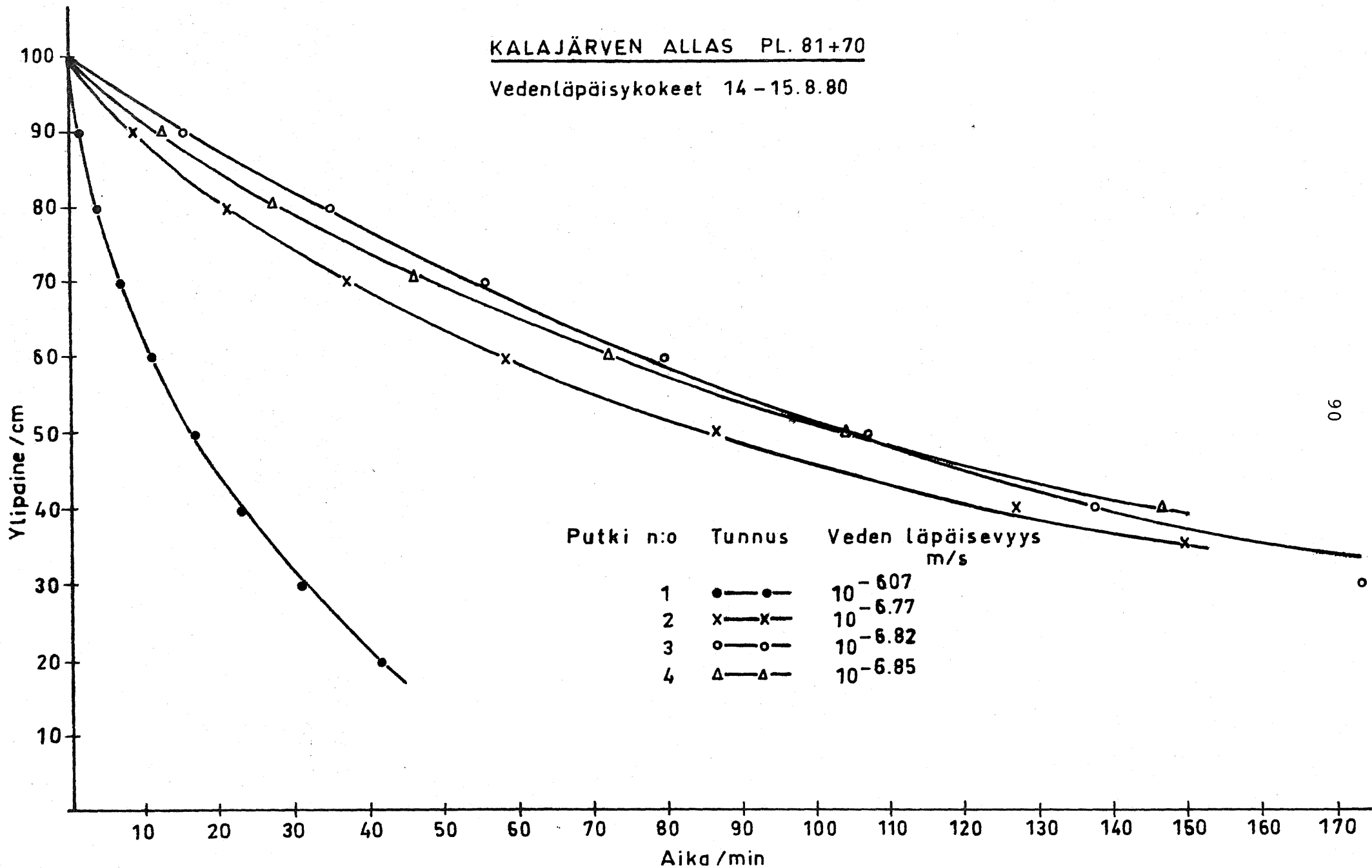
Patoon lyötiin sisähalkaisijaltaan  $\varnothing 41,7$  mm:n putket, joihin lisättiin 100 cm:n ylipaine. Kokeen kuluessa seurattiin vedenpinnan muutosta putkessa ajan funktiona. Vedenpinta mitattiin sähköisen luotaimen avulla. Kuvassa 41 on esitetty kokeen kaaviokuva.



Kuva 41. Vedenläpäisevyyskokeen kaaviokuva.

KALAJÄRVEN ALLAS PL. 81+70

Vedenläpäisykokeet 14 - 15.8.80



96

Kuva 42. Kalajärven allas, pl. 81+70. Vedenläpäisykokeet 14.-15.8.1980.

Kokeiden tulokset voidaan esittää kuvan 42 mukaisina käyriä.

Vedenläpäisevyyškertoimen arvot lasketaan kaavan (30) mukaan (merkinnät kts. kuva 41).

$$K = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{L}{R} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (30)$$

Kaavasta (30) saadaan laskettua vedenläpäisevyyškertoimen suuruus isotrooppisessa tapauksessa. Anisotrooppisuuden vaikutus voidaan ottaa huomioon jakamalla kärkikappaleen vaakamitat arvioidun vaak- ja pystysuoran vedenläpäisevyyškertoimien suhteen neliöjuurella  $m = \sqrt{k_x/k_y}$ , jolloin saadaan määritettyä keskimääräinen vedenläpäisykerroin  $K = \sqrt{k_x \cdot k_y}$ . Tälle saadaan kaava (31):

$$K = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{(mL)}{R} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (31)$$

Anisotrooppisuuden huomioimisella ei ole kovinkaan suurta vaikutusta vedenläpäisevyyškertoimien arvoihin. Koe antaa lähinnä suurimman vedenläpäisevyyden arvon suuruusluokan, joten anisotrooppisuuden huomioimista voidaan pitää tässä tapauksessa turhana.

### 5.312 Tulosten tarkastelua

Kesällä 1979 tehtyjen kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 12. Tuloksista havaitaan, että Hirvijärven ja Kivi- ja Levalammen mittauksissa ei ole havaittu läpäiseviä kerroksia kaikkien havaintojen k-arvon ollessa parempia kuin vaatimustaso,  $k \leq 10^{-6,5}$  m/s.

Liikapuron maapadossa on havaittavissa hieman vaatimusta huonompia arvoja noin 1,5 metrin syvyyteen padon pinnasta. Vaikutus ei kuitenkaan ulotu suotovesiverkoston tasoon, eivätkä arvot ole hälyyttävää luokkaa. Kalajärvellä on niin ikään havaittavissa vaatimustasoa huonompia arvoja noin 2 metrin syvyyteen saakka. Lisäksi paalulla 78+00 on havaittu erittäin huono arvo tasolla +105,00.

Taulukko 12. Vedenläpäisykokeiden tulokset kesältä 1979.

Pato	Pn:o	Padon harjan korkeus	Putken korkeus		Veden läpäisevyys [m/s]
			Yläpää	Alapää	
Hirvi-järvi	8+00	90,50		88,50	10 <sup>-7,36</sup>
		-"-		88,00	10 <sup>-7,36</sup>
	39+00	-"-		88,50	10 <sup>-7,80</sup>
		-"-		88,00	10 <sup>-8,43</sup>
Liika-puro	12+00	134,45		133,00	10 <sup>-6,15</sup>
		-"-		132,50	10 <sup>-6,61</sup>
		-"-		132,00	10 <sup>-7,07</sup>
		133,01		131,50	10 <sup>-6,34</sup>
	14+20	-"-		131,00	10 <sup>-6,64</sup>
		134,62		133,00	10 <sup>-6,63</sup>
		-"-		132,50	10 <sup>-6,98</sup>
		-"-		132,00	10 <sup>-7,21</sup>
	24+20	133,00		131,50	10 <sup>-6,45</sup>
		-"-		131,00	10 <sup>-6,89</sup>
		134,20		133,00	10 <sup>-6,18</sup>
		-"-		132,50	10 <sup>-6,48</sup>
		-"-		132,00	10 <sup>-6,64</sup>
		133,00		131,50	10 <sup>-6,28</sup>
		-"-		131,00	10 <sup>-6,26</sup>
		-"-		131,00	10
Kivi-ja Levalampi	8+05	80,25		78,70	10 <sup>-7,21</sup>
		-"-		78,20	10 <sup>-7,66</sup>
		-"-		77,70	10 <sup>-7,30</sup>
	9+43	80,35		78,70	10 <sup>-7,20</sup>
		-"-		78,20	10 <sup>-7,58</sup>
		-"-		77,70	10 <sup>-7,38</sup>
	12+73	80,35		78,70	-
		-"-		78,20	10 <sup>-8,34</sup>
		-"-		77,70	10 <sup>-8,24</sup>
		-"-		77,70	10
Kala-järvi	10+00	107,25		105,50	10 <sup>-6,22</sup>
		-"-		105,00	10 <sup>-6,67</sup>
		-"-		104,50	10 <sup>-7,60</sup>
	20+00	107,15		105,50	10 <sup>-6,99</sup>
		-"-		105,00	10 <sup>-6,95</sup>
		-"-		104,50	10 <sup>-6,85</sup>
	66+00	107,20		105,50	10 <sup>-7,04</sup>
		-"-		105,00	10 <sup>-7,41</sup>
		-"-		104,50	10 <sup>-7,13</sup>
	72+00	107,15		105,50	10 <sup>-6,87</sup>
		-"-		105,00	10 <sup>-7,65</sup>
		-"-		104,50	10 <sup>-7,39</sup>
	78+00	107,00		105,50	10 <sup>-8,35</sup>
		-"-		105,00	10 <sup>-5,10</sup>
		-"-		104,50	10 <sup>-6,24</sup>
	83+30	107,10		105,50	10 <sup>-6,55</sup>
		-"-		105,00	10 <sup>-6,18</sup>
		-"-		104,50	10 <sup>-6,29</sup>

Taulukko 13. Vedenläpäisykokeet kesällä 1980 Kalajärven maapadossa.

Pn:o	Padon harjan korkeus	Putken korkeus		Vedenläpäisykokeen tulos [m/s]	Rakennusaikainen arvo [m/s]
		Yläpää	Alapää		
81+00	107,30	108,03	106,03	$10^{-6,34}$	$10^{-7,00}$
	"-	107,54	105,54	$10^{-6,31}$	
	"-	108,01	105,01	$10^{-7,44}$	
	"-	107,55	104,55	$10^{-7,80}$	
81+70	107,29	108,00	106,00	$10^{-6,07}$	$10^{-6,68}$
	"-	107,47	105,47	$10^{-6,77}$	
	"-	108,02	105,02	$10^{-6,82}$	
	"-	107,53	104,53	$10^{-6,85}$	
82+10	107,21	107,94	105,94	$10^{-6,08}$	$10^{-7,36}$
	"-	107,46	105,46	$10^{-6,58}$	
	"-	107,98	104,98	$10^{-6,46}$	
	"-	107,38	104,38	$10^{-7,44}$	
82+50	107,28	107,99	105,99	$10^{-6,28}$	
	"-	107,53	105,53	$10^{-6,64}$	
	"-	108,04	105,04	$10^{-7,95}$	
	"-	107,52	104,52	$10^{-6,95}$	
82+70	107,34	108,07	106,07	$10^{-6,07}$	$10^{-6,92}$
	"-	107,57	105,57	$10^{-6,20}$	
	"-	108,08	105,08	$10^{-6,67}$	
	"-	107,57	104,57	$10^{-6,68}$	
82+90	107,32	108,01	106,01	$10^{-6,19}$	$10^{-7,06}$
	"-	107,52	105,52	$10^{-6,87}$	
	"-	108,06	105,06	$10^{-6,66}$	
	"-	107,54	104,54	$10^{-7,21}$	
83+10	107,29	108,02	106,02	$10^{-6,19}$	$10^{-7,29}$
	"-	107,49	105,49	$10^{-6,29}$	
	"-	108,03	105,03	$10^{-6,66}$	
	"-	107,42	104,42	$10^{-7,81}$	
83+30	107,24	107,95	105,95	$10^{-6,02}$	$10^{-6,94}$
	"-	107,48	105,48	$10^{-5,88}$	
	"-	108,00	105,00	$10^{-7,46}$	$10^{-7,25}$
	"-	107,48	104,48	$10^{-7,76}$	
83+70	107,29	108,07	106,07	$10^{-6,08}$	$10^{-7,35}$
	"-	107,55	105,55	$10^{-6,36}$	
	"-	108,05	105,05	$10^{-6,71}$	
	"-	107,49	104,49	$10^{-7,81}$	

Koska Kalajärven maapadossa oli vedenpäisykokeiden perusteella havaittavissa löyhtymistä, päätettiin suorittaa jatkotutmuksia padolla. Kokeet suoritettiin kesällä 1980 harjan pintaosissa ja tuloksia verrattiin rakennusaikaisiin määrityksiin. Rakennusaikaiset arvot eivät sinällään ole vertailukelpoisia, mutta niistä voidaan havaita yleinen suuruusluokka. Tutkimustulokset on esitetty taulukossa 13.

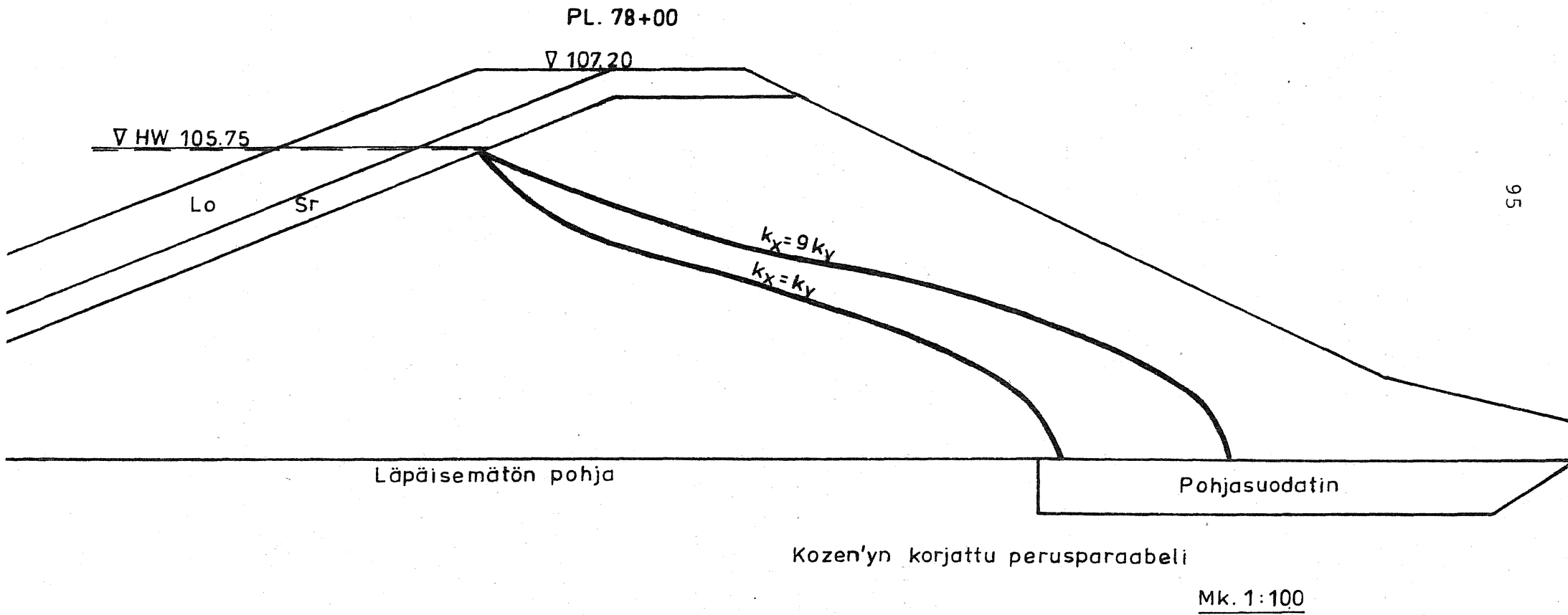
Tuloksista on nähtävissä systemaattinen löyhtyminen pintaosissa arvojen parantuessa mitä syvemmältä ne ovat. Löyhtymisen voidaan katsoa tapahtuneen aina tasolle +105,50, mikä on sama kuin altaan pitkäaikainen HW. Paalulta 83+30 on jälleen nähtävissä poikkeuksellisen huono arvo tasolla +105,50. Havaintojen perusteella voidaan päätellä routimisen muuttavan vedenläpäisevyysarvoja. On kuitenkin hyvin vaikeaa päätellä löyhtyykö rakenne roudan tunkeutumissyvyyteen saakka. Lisäksi on huomioitava kokeiden suorituksen ajankohta. On erittäin todennäköistä, että vedenläpäisyarvot keväällä roudan sulamisen aikoihin ovat suuremmat, maamassan painon tiivistäessä rakennetta kesällä. Voidaan myös todeta, etteivät ilmasto-olosuhteet ole olleet padon valmistumisen (v. 1977) jälkeisinä vuosina erityisen ankaria.

### 5.32 L ö y h t y m i s e n v a i k u t u k s e t v i r t a u s v e r k o s t o o n

Kalajärven maapadon vedenläpäisykokeiden tulosten johdosta päätettiin tutkia vedenläpäisyarvojen perusteella syntyvä virtausverkosto. Tutkittavaksi poikkileikkaukseksi valittiin pl. 78+00, mistä oli saatu huomattavan epäedullisia arvoja.

Kuvassa 43 on esitetty Kozenyn perusparabelin avulla piirretyt suotoviivat homogeenisessä tapauksessa vedenläpäisyarvojen suhteilla  $k_x = k_y$  ja  $k_x = 9k_y$ . Virtausverkoston muutos on tutkittu elementtimenetelmään pohjautuvalle tietokoneohjelmalla. Ohjelma ratkaisee kaksiulotteisen, kolmiomuo-toisiin elementteihin perustuvan suotovirtausprobleeman.

# KALAJÄRVEN MAAPATO



Kuva 43. Virtausverkosto Kalajärven maapadossa homogeenisessä tapauksessa.

Padon moreenivyöhyke on jaettu vedenläpäisevyyden mukaan pääasiassa vaakasuoriin kerroksiin lukuunottamatta kuivan luiskan pintaosaa. Vedenläpäisykertoimiksi on valittu havaintojen suuruusluokkaa olevat arvot ja kuivaan luiskaan on arvioitu noin 1,5 metriä paksu hieman löyhtynyt kerros, jonka vedenläpäisyarvoksi on annettu  $k_x = 10^{-6,3} \text{ m/s}$ . Laskelma annettiin reunaehtoina määrässä luiskassa altaan vesipinta moreenivyöhykkeen rajapisteissä sekä pohjasuodattimen yläpinnan taso. Altaan vedenkorkeutena käytettiin altaan kahden viikon sallittua HW:tä +105,75. Poikkileikkaus on padon toteutunut poikkileikkaus. Tiedot lähtöoletuksista ovat liitteissä 9 ja 11.

Suotovesiverkosto laskettiin tapauksilla  $k_x = k_y$  ja  $k_x = 9k_y$ . Liitteissä 9 ja 11 on esitetty laskelman tuloksena saadut suotoviivat sekä ekvipotentiaalipinnat. Liitteissä 10 ja 12 ovat tuloksina saadut nopeusvektorien suunnat. Tulokset osoittavat suotovesiverkoston muuttuneen oleellisesti epäedullisemmaksi. Vedenläpäisy-suhteella  $k_x = 9k_y$ , jota voidaan pitää realistisena, suotoviiva lähentelee padon kuivan luiskan pintaa. Saadut nopeudet eivät kuitenkaan yllä lähelle kriittisiä arvoja. Laskelman lähtöoletukset ovat yksinkertaistuksia, ja esim. tiiviimpien kerrosten olemassaolo kuivassa luiskassa nostaisi suotoviivan kuivan luiskan pintaan. Lisäksi löyhän kerroksen jatkuva routiminen ja löyhtyminen johtaa lopulta tilanteeseen, jossa virtausnopeudet kasvavat ja virtaava vesi alkaa vähitellen lajitella moreeniainesta aiheuttaen eroosiosortuman. Lisäksi virtausverkoston muutos on muuttanut padossa vallitsevia huokospainesuhteita, millä on epäedullinen vaikutus stabiliteettiin.

Todellisesta virtaustilanteesta ei ole tämän poikkileikkauksen kohdalta havaintoja, eikä padossa ole toistaiseksi silmämääräisesti havaittavissa suotautumista. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tilanne voi ajan mittaan muodostua vaaraksi padon turvallisuudelle.

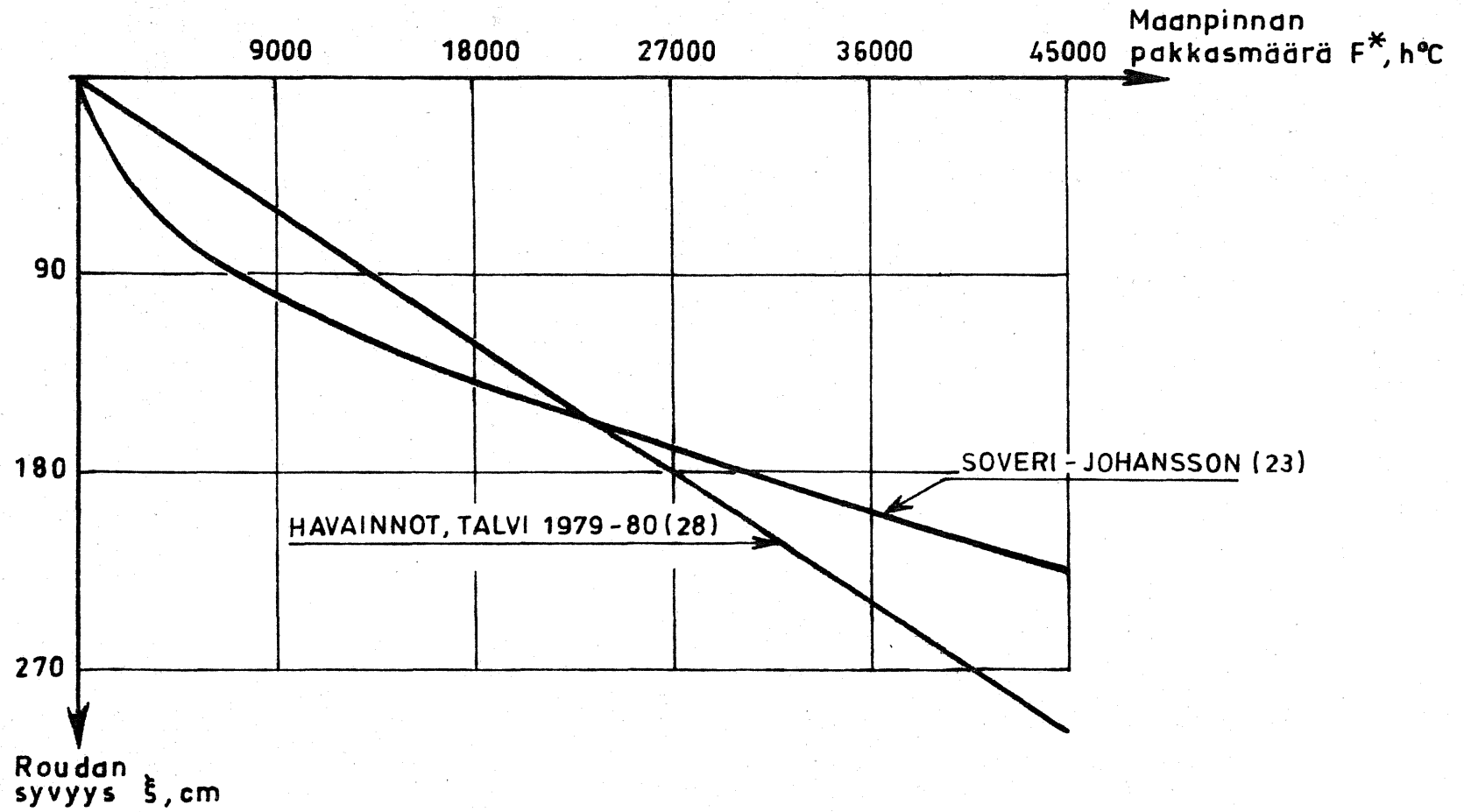
## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 6.1 ROUTAANTUMINEN

Kuvassa 44 on esitetty moreenimaapatojen routaantumista kuvaava havaintokäyrä (28) sekä Soveri-Johanssonin kaavan (23) mukainen riippuvuus pakkasmäärän ja roudan syyvyyden välillä. Kaavassa (23) on otettu huomioon korjaus  $F^* = 1,25 F$  ja materiaalikerroin  $c$  on valittu kosteuspitoisuuden  $w = 8,3 \%$  mukaan ( $c = 1,159$ ).

Kuvaa tulkittaessa on muistettava, että havaintokäyrän (28) virhe kasaantuu alhaisille pakkasmäärille, koska tällöin lumipeitteen merkitys on suurimmillaan. Suuremmilla pakkasmäärillä pienenee maanpinnan pakkasmäärän arvioinnista aiheutuva virhe. Kun verrataan Soveri-Johanssonin /25/ ja tämän tutkimuksen havaintoja keskenään, voidaan todeta roudan tunkeutuvan moreenimaapadoissa syvemmälle kuin tierakenteisissa vastaavissa olosuhteissa. Esimerkiksi talven 79-80 pakkasmäärällä  $F^* \approx 30000 \text{ h}^\circ\text{C}$ , on roudan syvyys Soveri-Johanssonin havaintojen mukaan 180 cm, kun taas moreenimaapadoissa roudan syvyydeksi saadaan 198 cm. Kaava (28) saattaa antaa hieman liian suuria arvoja suurilla pakkasmäärillä, sillä tutkimusaineistoon kuului ainoastaan alhaisempia pakkasmäärän arvoja ( $F^* < 30000 \text{ h}^\circ\text{C}$ ) ja laajemmalla havaintoaineistolla käyrän (28) muoto saattaisi lähestyä kaavan (23) muotoa.

Routaantumisen teoreettisessa tarkastelussa osoittautui ns. parannettu Watzingerin menetelmä käyttökelpoiseksi virheen pysytellessä kohtuullisena ( $\approx 20-30 \%$ ). Menetelmällä lasketut roudan syyvydet ovat havaintokäyrään (28) nähden noin 10 % suurempia, mikä aiheutuu siitä, ettei Watzingerin menetelmässä huomioida altaan lämmittävää vaikutusta. Teoreettisiin laskentamenetelmiin liittyvistä virhemahdollisuuksista johtuen antaisi maapatojen routaantumisesta realistisemmän kuvan havaintoihin perustuva tilastollinen malli. Mallin kehittäminen vaatisi useamman vuoden havainnot. Tilastollinen tutkimus tulisi perustua lähinnä ilmastollisten tekijöiden vaikutuksen tarkasteluun huolimatta kosteuspitoisuuden oleellisesta merkityksestä. Kosteuspitoisuus vaikuttaa routaan-



Kuva 44. Soveri-Johanssonin /25/ ja moreenimaapatojen roudan syvyyshavaintojen vertailu.

tumistapahtumassa lämmönjohtavuuteen sekä jäätyislämpöön. Korkea vesipitoisuus kohottaa maan jäätyislämpöä ja siten vähentää routaantumista. Koska kosteuspitoisuuden muutosten tarkkailu on hankalaa ja kallista, ei ole syytä ottaa kosteuspitoisuuden muutosten vaikutusta huomioon itsenäisenä tekijänä mallissa.

Tällä hetkellä voidaan pitää käyttökelpoisena tarkastelua, jossa käytetään rinnakkain kaavaa (28) ja ns. parannettua Watzingerin menetelmää. Lumipeitteen vaikutus pakkasmäärään tulee huomioida kappaleessa 2.412 esitetyllä tavalla.

## 6.2 ROUTIMINEN

Routimisesta ei voida vedenläpäisykokeiden perusteella vetää yleispäteviä johtopäätöksiä. Huolimatta tutkittujen patojen moreenimateriaalien rakeisuuksien samankaltaisuudesta on havaittavissa selvät erot vedenläpäisytilanteen muutoksissa. Nämä erot aiheutunevat ns. olosuhdetekijöistä (huokosvedenpinnan korkeus, altaan vedenkorkeus jne.). Koska kuitenkin tietyissä rakenteissa on tapahtunut löyhtymistä siinä määrin, että sisäisen eroosion synty ajan mittaan on mahdollista, tulisi rakenne suojata niin, ettei suotautumisvyöhykkeeseen aiheudu routimishaittoja.

Maamassan painon takia on kuitenkin kyseenalaista aiheutuko rakenteeseen routimishaittoja roudan suurimmalla tunkeutumissyvyydellä. Kaikista em. epävarmuustekijöistä johtuen ei ole taloudellisesti perusteltua käyttää routasuojauksen mitoituksessa maksimipakkasmääriä. Kanadassa /17/ esitettyä kerran 10 vuodessa toistuvan pakkasmäärän käyttöä voidaan pitää riittävänä. Tämä johtaisi kuvan 38 mukaan esim. Pohjanmaalla 2,40 metrin suojakerrokseen. Suojaus on tärkeintä nimenomaan harjalla, ettei padon yläosaan muodostuisi läpäiseviä kerroksia. Mikäli padon suunnittelussa ja rakentamisessa aikaansaatu virtausverkosto toimii "normaaliin" tapaan riittää kuiivan luiskan suojauskerrokseksi 0,3 metriä paksu humusmaakerros nurmetuksineen.

### 6.3 TOIMENPITEET VAASAN VESIPIIRIN PADOILLA

Tutkituista padoista oli havaittavissa löyhtymistä Kalajärven ja Liikapuron maapadoissa. Näistä Kalajärven maapadolla saadut arvot osoittavat padon olevan välittömästi tarkastuksen tarpeessa. Padoilla ehdotetaan suoritettavaksi seuraavia toimenpiteitä:

- Kalajärvi. Padon suotovesipinnan tarkkailua on tehostettava ja paaluille 78+00 ja 83+30 on asennettava tarkkailu-putket todellisen suotovesivirtauksen määrittämiseksi. Mikäli suotovesipinta on hyvin korkealla tasolla, on vaihtoehtoisesti joko paikallistettava ja tiivistettävä löyhtyneet kerrokset tai rakennettava sorakerros kuivaan luiskaan eroosiovaurioiden estämiseksi. Padon kuivavara tulee korottaa 2,4 metrin korkuiseksi. Mikäli kuivaan luiskaan ei rakenneta sorakerrosta, tulee luiskan humusmaakerros vahvistaa 0,3 metriä paksuksi.
- Kivi- ja Levalampi. Padossa ei ole havaittu vahinkoja. Kuivavaran korotus 2,4 metriä korkeaksi tulee ottaa harkittavaksi. Kuivan luiskan humusmaakerroksen paksuuden tulee olla 0,3 metriä.
- Hirvijärvi. Padossa ei ole havaittu vahinkoja. Kuivavara tulee korottaa 2,4 metriä korkeaksi.
- Liikapuro. Padossa on havaittavissa lievää löyhtymistä. Padon harjan pinta tulisi suojata 0,5 metriä paksulla sorakerroksella. Kuivan luiskan humusmaakerroksen tulee olla 0,3 metriä paksu.
- Kyrkösjärvi. Padon harjan kuivavara tulee rakentaa 2,4 metriä korkeaksi ja kuivan luiskan turvekerroksen tulee olla vähintään 0,3 metriä paksu.

### 6.4 ROUTIMISEN HUOMIOIMINEN MAAPATOJEN SUUNNITTELUSSA

Maapatojen routimistarkastelussa on aloitettava materiaalin tutkimisesta. Routivuustutkimus on suoritettava "Pohjarakennusohjeiden" /19/ mukaan lisättynä kapillaarisuuden arvostelulla. Mikäli materiaalitarkastelua ei tarkemmin suoriteta, on moreenia aina pidettävä erittäin routivana maalajina.

Maapatojen routasuojaukselle ei voida antaa yksityiskohtaista, yleispätevää ohjetta. Kukin kohde tulee suunnitella omana kokonaisuutenaan ottamalla huomioon turvallisuusrisikit ja teknillis-taloudelliset seikat. Padoissa, joissa eroosio aiheuttaa turvallisuusriskin, on pyrittävä riittävään routasuojaukseen. Padon kuivavaran korkeuden määrittämisessä on huomioitava kerran 10 vuodessa toistuvan pakkasmäärän perusteella lasketun roudan tunkeutumissyvyyden vaatima suojakerroksen paksuus. Lisäksi padon pintaosat on suojattava harjalla 0,5 metrin sorakerroksella ja kuivassa luiskassa 0,3 metriä paksulla humusmaakerroksella. Em. arvot eivät sulje pois kokemuseräisen tiedon käyttöä pintasuojauksen paksuuden määrittämisessä.

Routiminen tulee huomioida myös padon stabiliteettitarkastelussa. Routivan materiaalin leikkauslujuusparametrien arvoja tulee pienentää 20-30 % routivassa kerroksessa.

Lopuksi on korostettava maapadon rakennusaikaisen valvonnan ja käytön aikaisen tarkkailun merkitystä, sillä padon todellisesta toiminnasta saadaan oikea kuva ainoastaan tarkkailun avulla.

## 7. Y H T E E N V E T O

Tutkimuksessa on käsitelty teoreettisten ja tilastollisten menetelmien avulla moreenimaapatojen routaantumista. Lisäksi on kirjallisuustietojen ja havaintojen perusteella selvitetty routimisen vaikutusta maapatojen rakenteeseen.

Roudansyvyyshavaintojen tutkimisessa käytettiin ns. parannettua Watzingerin menetelmää sekä regressioanalyysiä. Tutkimuksessa todettiin, että em. mainittujen menetelmien avulla saadaan riittävä tarkkuus routaantumisen analysointiin. Regressioanalyysillä saatiin moreenimaapatojen routaantumista kuvaamaan seuraava malli:

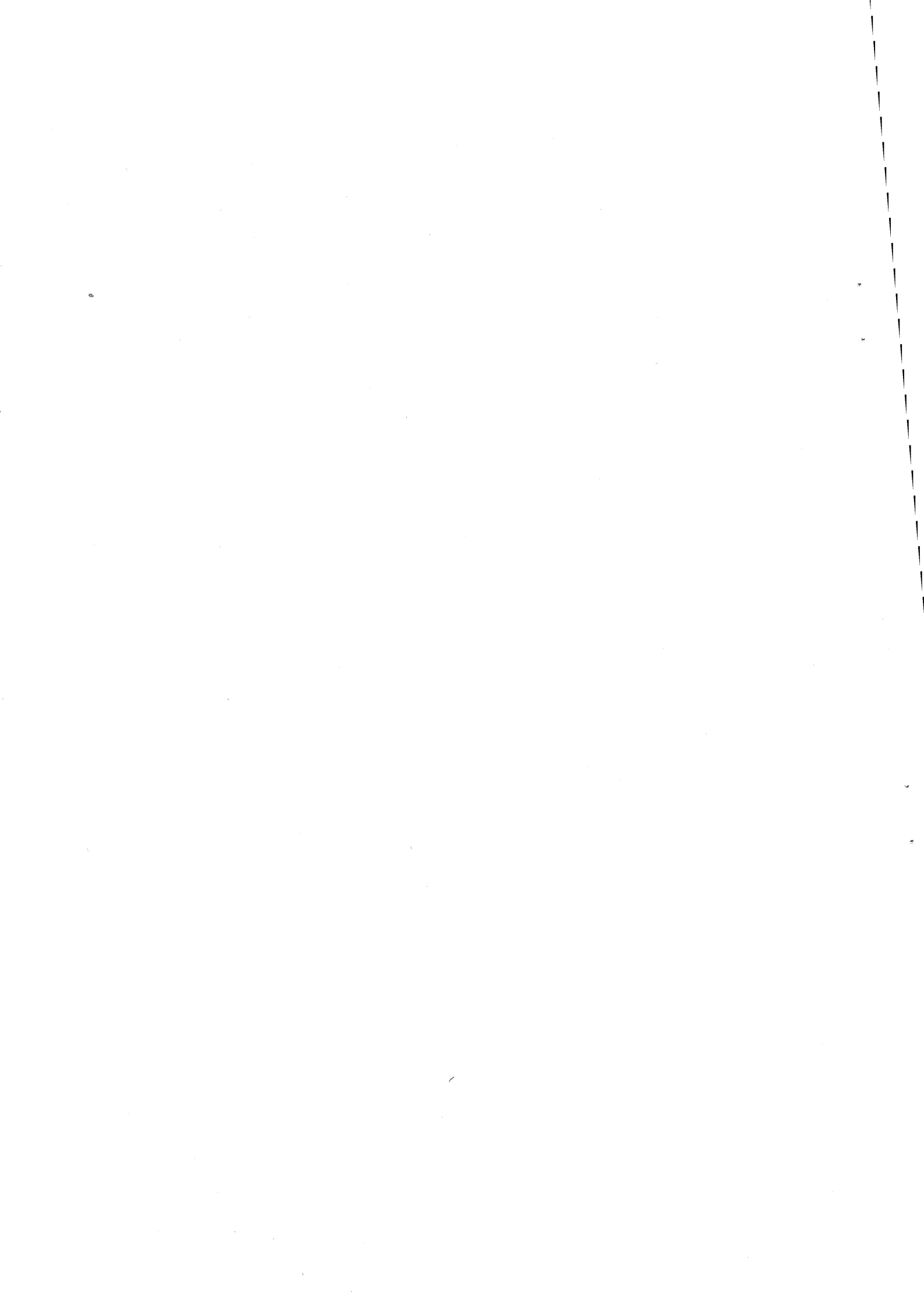
$$\xi = 0,00688 \cdot F^{0,996}$$

Moreenimaapatojen routaantuminen on havaintojen perusteella suurempaa kuin tierakenteiden vastaavissa olosuhteissa.

Routiminen vaikuttaa maapatoihin sisäisen ja ulkoisen eroosion synnyttäjänä sekä stabiliteettiä heikentävänä tekijänä. Vaikutus stabiliteettiin tutkittiin kirjallisuustutkimuksena. Tietojen pohjalta voidaan Suomessakin pitää oikeutettuna neuvostoliittolaisten normien /27/ ohjetta leikkauslujuusparametrien pienentämisestä 20-30 % routivassa kerroksessa.

Eroosiokysymyksistä keskityttiin sisäisen eroosion syntymahdollisuuksien tutkimiseen. Tutkimuskohteissa suoritettiin kenttävedenläpäisevyyskokeita routimisen vaikutusten selvittämiseksi. Tulosten perusteella voidaan sanoa routimisen muuttavan moreenin rakennetta siinä määrin, että vedenläpäisevyyteen tulee huomattava muutos. Ilmiö ei ole kuitenkaan yksiselitteinen, vaan erilaiset olosuhdetekijät (routaantumisnopeus, vedenkorkeus jne.) vaikuttavat routimiseen ja täten vedenläpäisevyytilanteen muutokseen. Elementtimenetelmän avulla tutkittiin suotovirtaustilanteen muutoksen suuruutta ja todettiin muutoksen olevan sitä luokkaa, että tilanne ajan mittaan on vaaraksi padon turvallisuudelle.

Johtopäätöksenä päädyttiin siihen, että maapatojen suunnittelussa tulisi entistä tarkemmin huomioida routasuojauksen tarve. Padon kuivavaran korkeuden mitoittamisessa tulee huomioida kerran 10 vuodessa toistuvan pakkasmäärän aiheuttaman routaantumisen vaatima suojakerros. Lisäksi padon pintaosat tulisi suojata harjalla sorakerroksella ja kuivassa luiskassa humusmaakerroksella.



## S U M M A R Y

The frost penetration of moraine dams has been dealt with in the research project with the help of theoretical and statistical methods. In addition, the frost action on the structure of earth dams has been clarified on the basis of published information and observations.

In the investigation of frost depth observations, both the so-called improved Watzinger method and regression analysis were used. The research proves that, for example, with the above-mentioned methods, a sufficient precision is achieved in the analysis of frost penetration. Regression analysis has enabled the representation of the frost penetration of moraine dams according to the following model:

$$\xi = 0,00688 \cdot F^{0,996}$$

The frost penetration of moraine dams, on the basis of observations, is greater than that of road structures in comparable conditions.

Frost action affects earth dams by giving rise to internal and external erosion and by weakening stability. The effect on stability has been investigated by literature research. On the basis of the information we, in Finland, ought to take for guidance the Soviet norm /27/, reducing the shear strength parameters 20-30 % in the layer, which is affected by frost action.

In the question of erosion, the investigation concentrated on the chances of internal erosion occurring. The object of the research was to carry out field permeability tests to clarify the effect of frost action. On the basis of the results we can conclude that frost action affects the structure of moraine to the extent that a significant change takes place in permeability. However the phenomenon is not unambiguous, but different prevailing circumstances (the speed of frost penetration, water level, etc.) affect the frost action and, consequently, the change in permea-

bility. With the assistance of the element method, the extent of the change in the seepage was investigated and it was shown that the change is extensive enough to be, in time, a danger to the safety of the dam.

The primary conclusion reached was that, in the planning of earth dams, more attention than previously should be paid to protection against frost action. In the demensioning of the height of the dam's freeboard, attention should be paid to the need for a protective layer against frost penetration caused by the freezing index which happens once every ten years. In addition, the dam's surface areas should be protected by a layer of gravel on the crest and by a layer of peat on the dry slope.

K I R J A L L I S U U S L U E T T E L O

1. Aittomäki, A. Saviharju, K. Rakennuksen perustusten lämpö-  
teknillinen toiminta ja routasuojaus. Helsinki 1975.  
Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Rakennus- ja  
yhdyskuntatekniikka. Tiedonanto 15.
2. Beskow, G. Tjälbildningen och tjällyftningen. Statens  
Väginstitut. Meddelande 48. Stockholm 1935.
3. Cedergren, H.R. Seepage, drainage and flow nets. 1967.
4. Ehrola, E. Ilmastollisten ja rakenteellisten tekijöiden  
vaikutuksesta tien routaantumiseen. Oulu 1973.  
Oulun Yliopisto, tie- ja maarakennustekniikan  
laitos. Lisensiaattityö.
5. Jansson, L-E. Frost penetration in sandy soil. Stockholm  
1964. Transactions of the Royal Institute of  
Technology.
6. Kalliomäki, M-L. Talviolosuhteiden ja jäätyminen vaiku-  
tuksesta moreenin ominaisuuksiin maapatoa raken-  
nettaessa. Helsinki 1970. Maataloushallituksen in-  
sinööri-osasto, maa- ja vesitekniillinen tutkimus-  
toimisto. Tiedosto 7/1970.
7. Kankare, E. Voutilainen, L. Tienpitoon vaikuttavista il-  
mastotekijöistä. Espoo 1972. Valtion teknillinen  
tutkimuskeskus. Tie- ja liikennelaboratorio. Tie-  
donanto 7.
8. Kersten, M.S. Thermal properties of soils. University of  
Minnesota Eng. Exp. Station. Bull.-28.1949.
9. Kolkki, O. Taulukoita ja karttoja Suomen lämpöoloista  
kaudelta 1931-1960. Liite Suomen meteorologiseen  
vuosikirjaan, nide 65, osa la-1965. Helsinki 1966.  
Ilmatieteen keskuslaitos.
10. Kotakorpi, J. Hiekan ja moreenin deformatuminen stokas-  
tisena prosessina. Diplomityö. Oulun Yliopisto.  
Oulu 1979.
11. Körkkö, R. Hautaperän moreenin mekaaniset ominaisuudet.  
Diplomityö. Oulun Yliopisto. Oulu 1979.
12. Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, osa V.  
Helsinki 1970. Tie- ja vesirakennushallitus.
13. Maijala, T. Hautaperän maapadon suotovirtauksista.  
Diplomityö. Oulun Yliopisto. Oulu 1978.

14. Mustonen, S.E. Ilmasto- ja maastotekijöiden vaikutuksesta lumen vesiarvoon ja roudan syvyyteen. Helsinki 1965. Maataloushallituksen insinööriosasto, maa- ja vesiteknillinen tutkimustoimisto.
15. Mäkelä, H. Tamminrinne, M. Rakennusten perustusten routasuojausohje. Espoo 1979. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 37.
16. Palosaari, S. Epälineaarinen käyränsovitushjelma. Otaniemi 1978. Teknillinen korkeakoulu. Kemian laitekniikan laboratorio.
17. Paré, J.J. Lavallée, J.G. Frost penetration studies in glacial till on the James Bay hydroelectric complex. Canadian Geotechnical Journal. 15(1978):4.
18. Pohjarakennus. Helsinki 1974. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Julkaisu RIL 95.
19. Pohjarakennusohjeet. Helsinki 1979. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Julkaisu RIL 121.
20. Rakennustekniikan käsikirja, osa II. Helsinki 1970.
21. Ruckli, R. Der frost im baugrund. Wien 1950.
22. Sherard, J.L. Woodward, R.J. Gizienski, S.F. Clevenger, W.A. Earth and earth-rock dams. 1963.
23. Sikring mot teleskader. Oslo 1976. Norges teknisk-naturvitenskapelige forskningsråd og statens vegvesens utvalg for Frost i jord. Slutraport Nr. 17.
24. Skaven-Haug, Sv. Frostfundamenters dimensionering Frost i jord. 1971:3. Oslo 1971.
25. Soveri, U. Johansson, S. Havaintoja lumesta raivatun maan routaantumisesta ja sulamisesta Suomessa v. 1958-1964. Helsinki 1966. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Julkaisu 107.
26. Taivainen, O.A. Maalajien roudanarkuus ja routimisuus. Rakennusinsinööri 17 (1961):4.
27. Tipovye projektrye resenija. 820-0-1. Sekcii zemljanyh nasypnyh plotin vysotoj fo 15 m skreplenym verhovym otkosom. Albom I, pojasnitelnaja zapiska. Novosibirsk 1977.
28. Tsyтовich, N.A. The mechanics of frozen ground, 1975.
29. U.S. Corps of Engineers. The Unified Soil Classification System. Appendix B. Characteristics of soil groups pertaining to roads and airfields. Tech. memo 3-357. U.S. Dept. of Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. Vol.3.

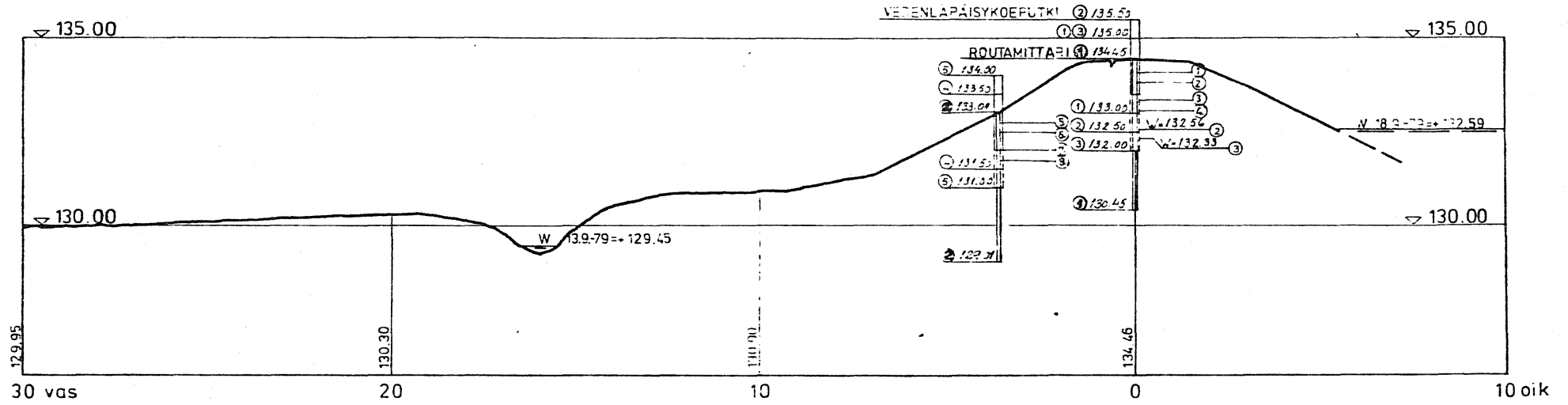
30. Watzinger, A. Kindem, E. Michelsen, B. Masseutskiftiningsmaterialer for teleforbygning på vei og jernbane: Varmetekniska undersøkelser. Oslo 1965. Norges Geotekniska Institutt.
31. Williams, P.J. Properties and behaviour of freezing soils. Oslo 1967. Norwegian Geotechnical Institute, Publikation nr. 72.
32. Zaikoff, D.W. Dascal, O. Penetration du gel dans les sols et les barrages en terre/ou enrochement. 1973. Etude bibliographique. Hydro-Quebec Report.



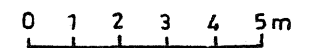
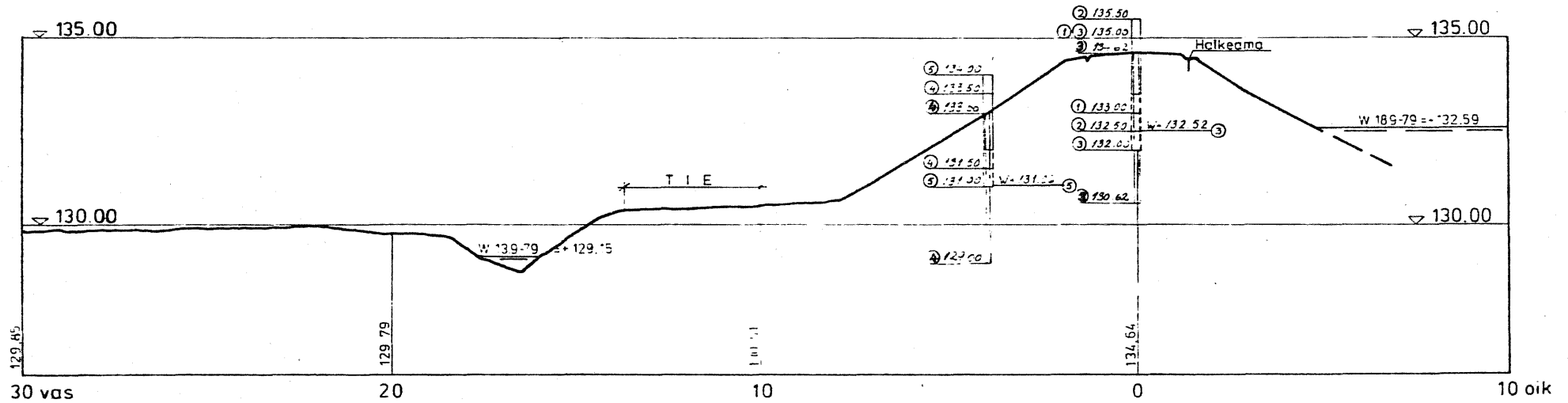
LIIKAPURON MAAPATO

Routamittarit

PI 12+00



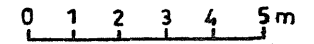
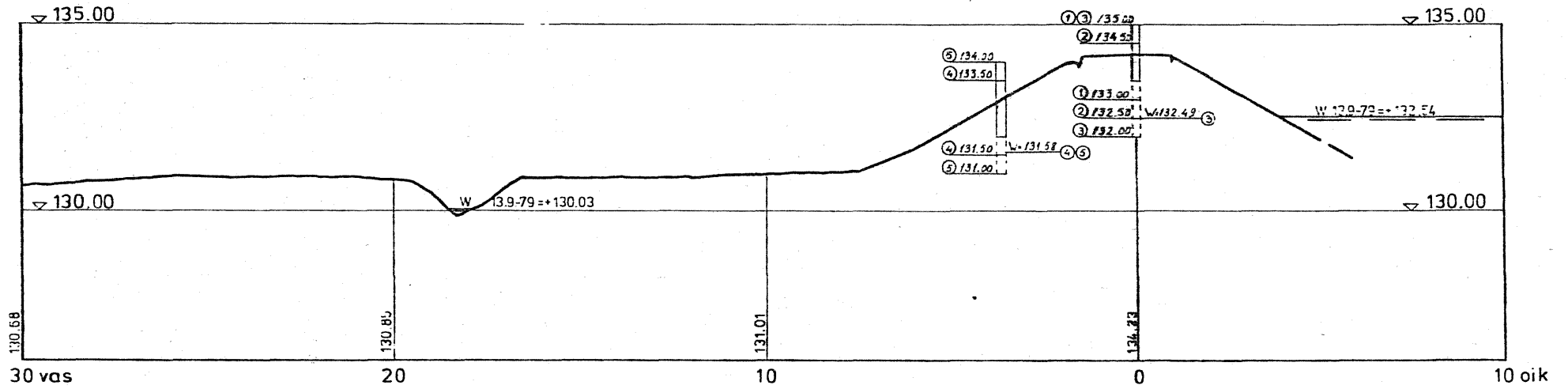
PI 14+20



LIIKAPURON MAAPATO

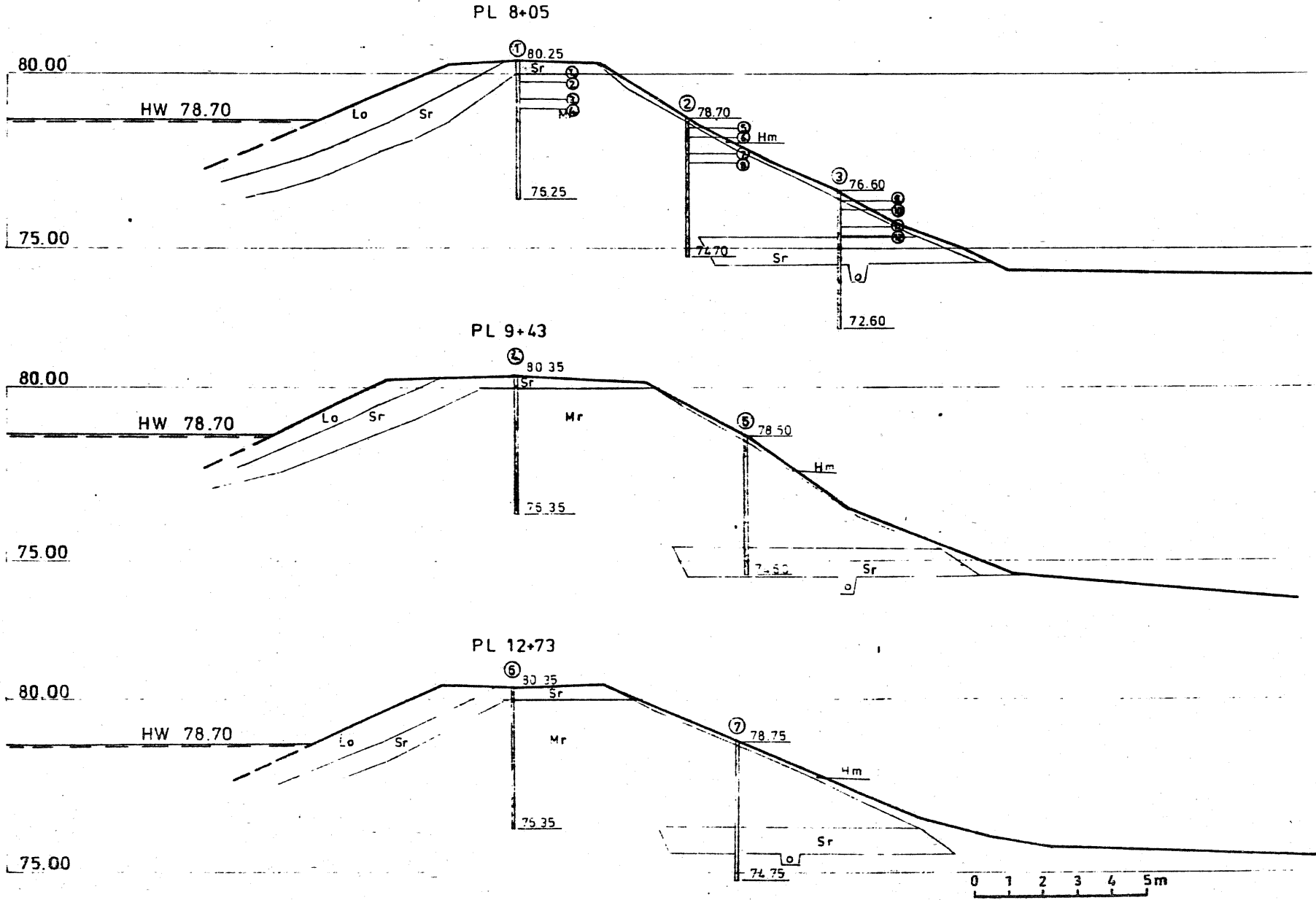
Routamittarit

PI 24+20



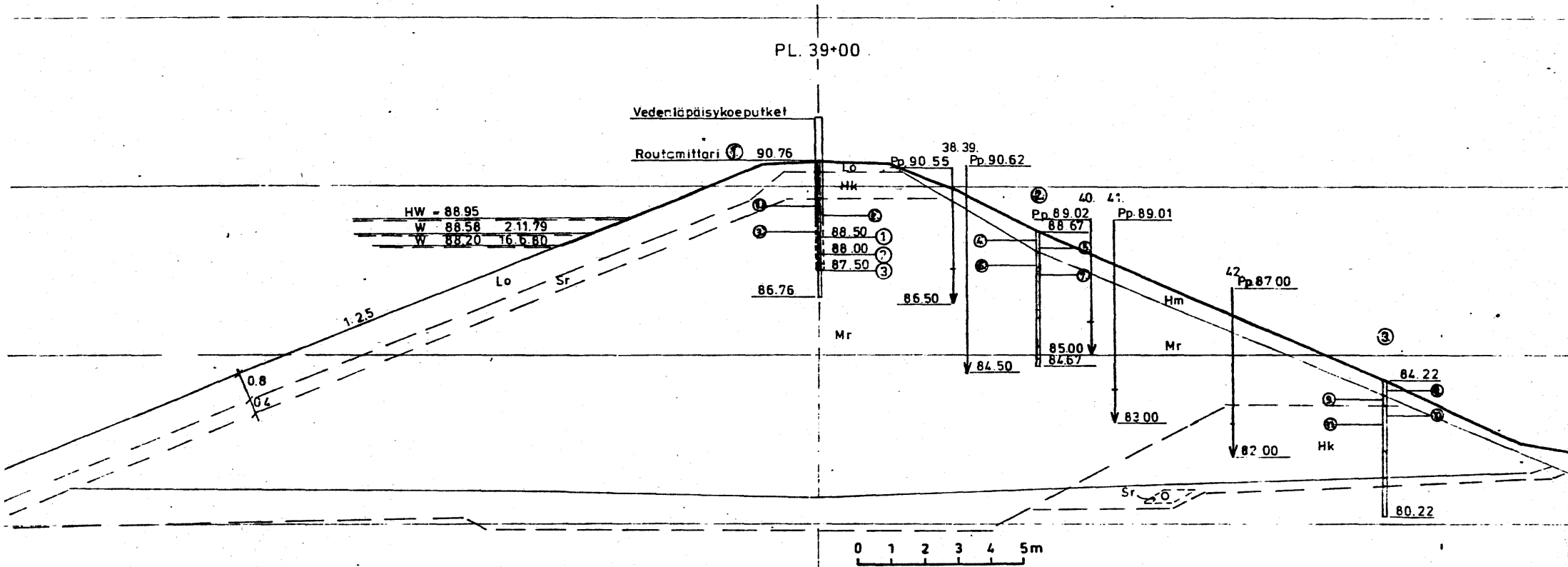
KIVI- JA LEVÄLAMMEN MAAPATO

Routamittarit



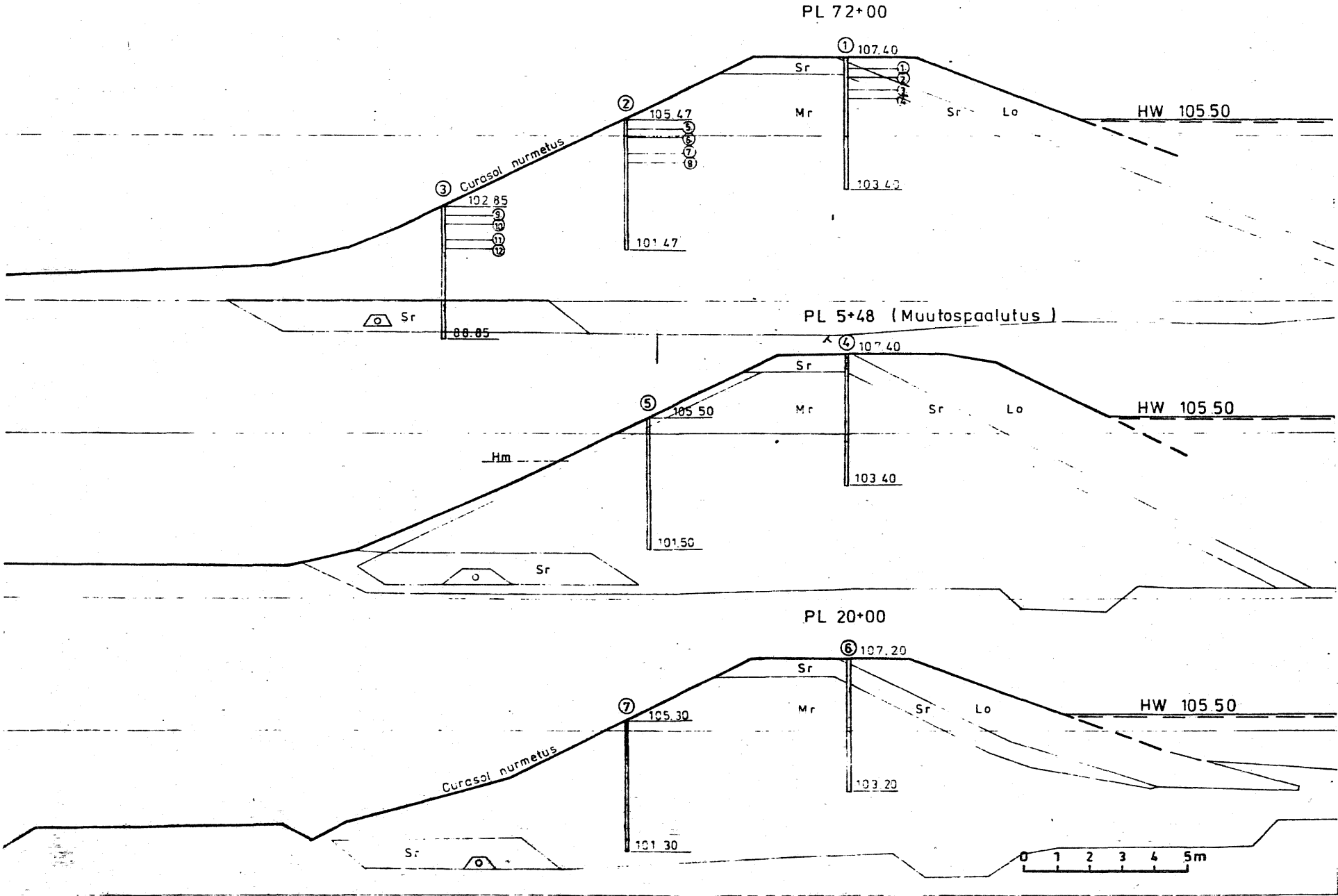
**HIRVIJÄRVEN MAAPATO**

**Routamittarit**



**KALAJÄRVEN MAAPATO**

**Routamittarit**



KYRKÖSJÄRVEN MAAPATO

Routamittarit

Pl. 37+00

① 8117

HW 81.25

77.17

Pl. 50+00

② 79.46

75.46

Pl. 57+00

③ 82.92

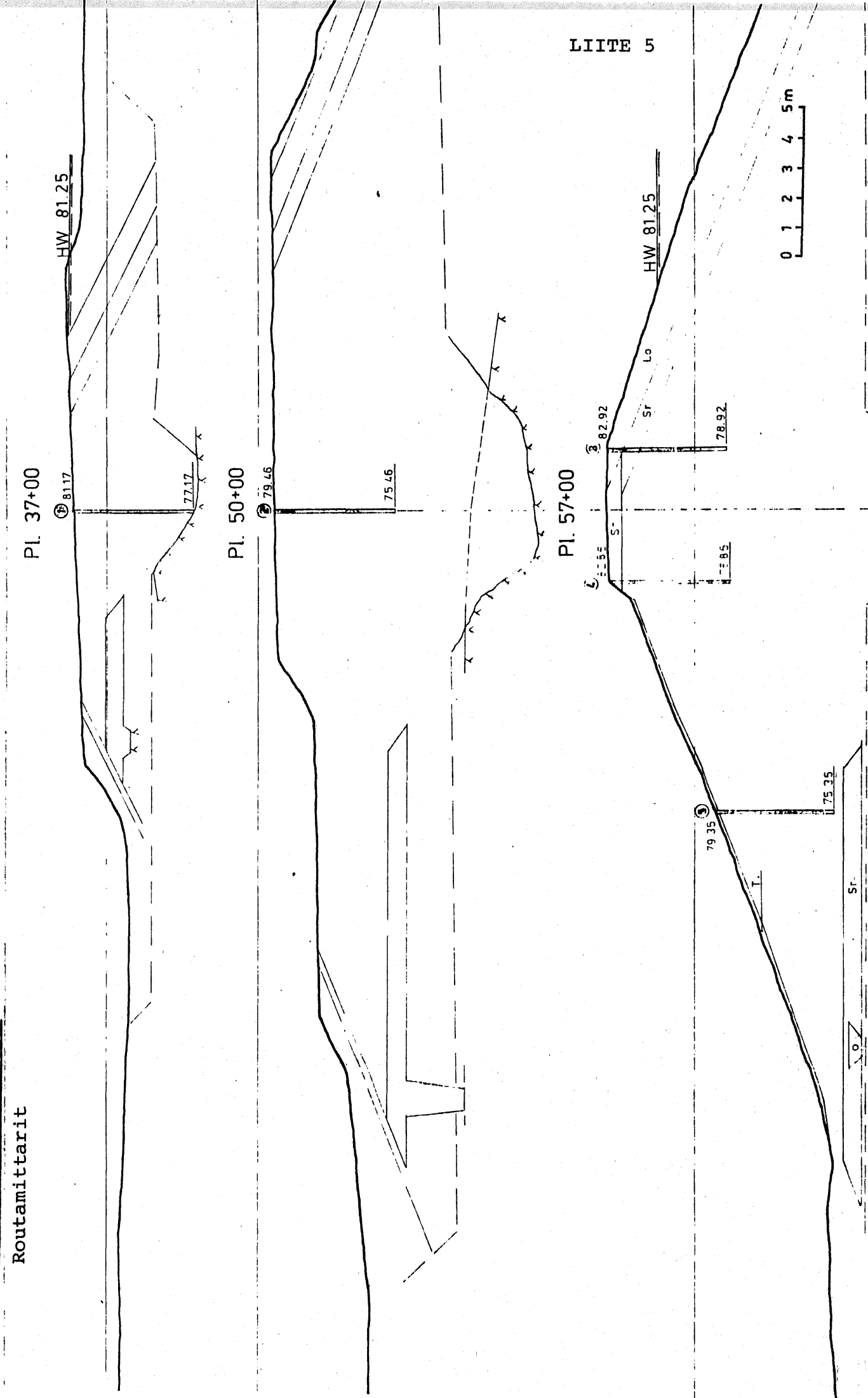
HW 81.25

79.35

78.92

75.35

LIITE 5

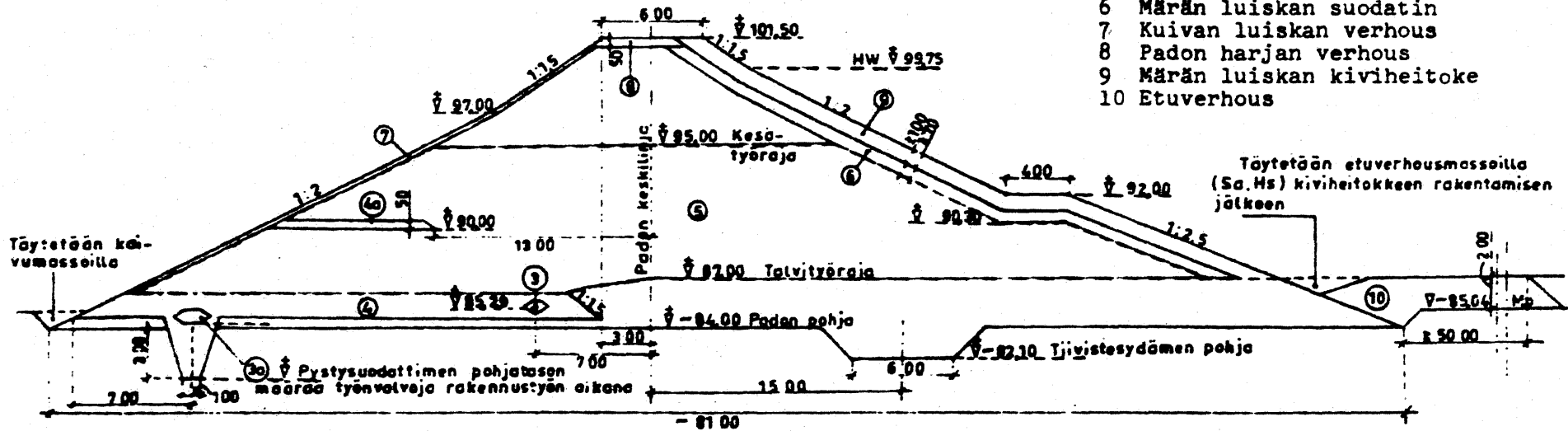


HAUTAPERÄN MAAPATO

PL 8+40; PL 7+80 - 9+20

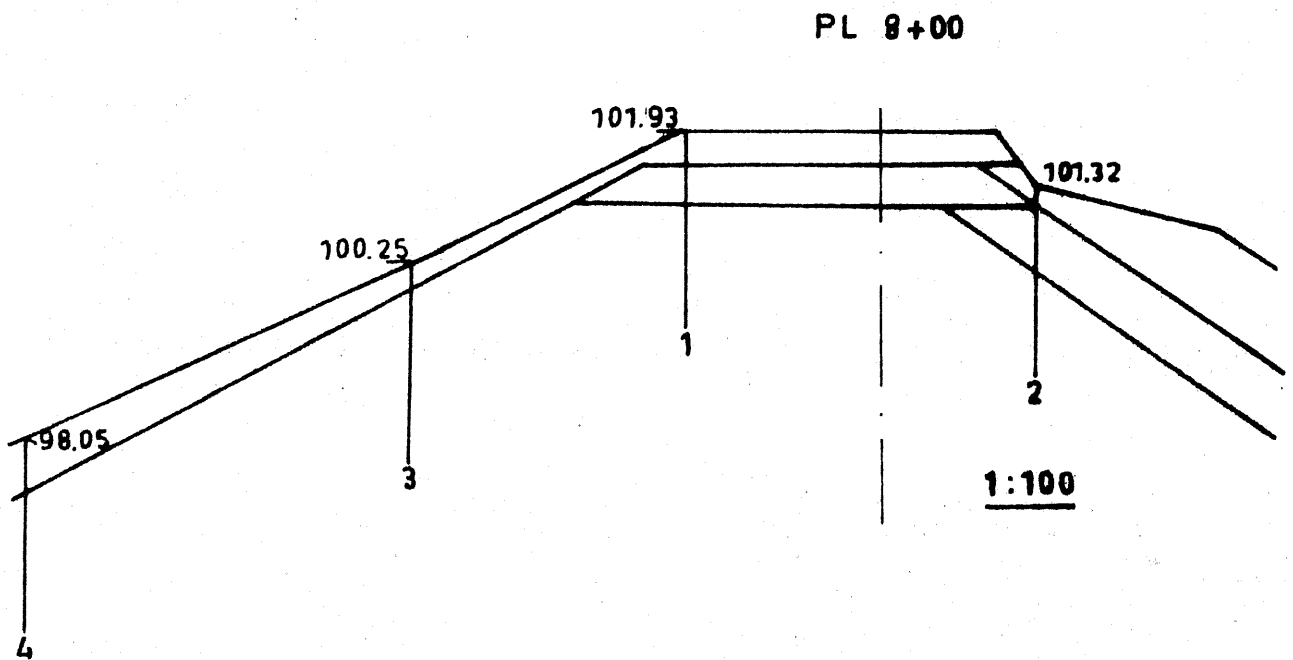
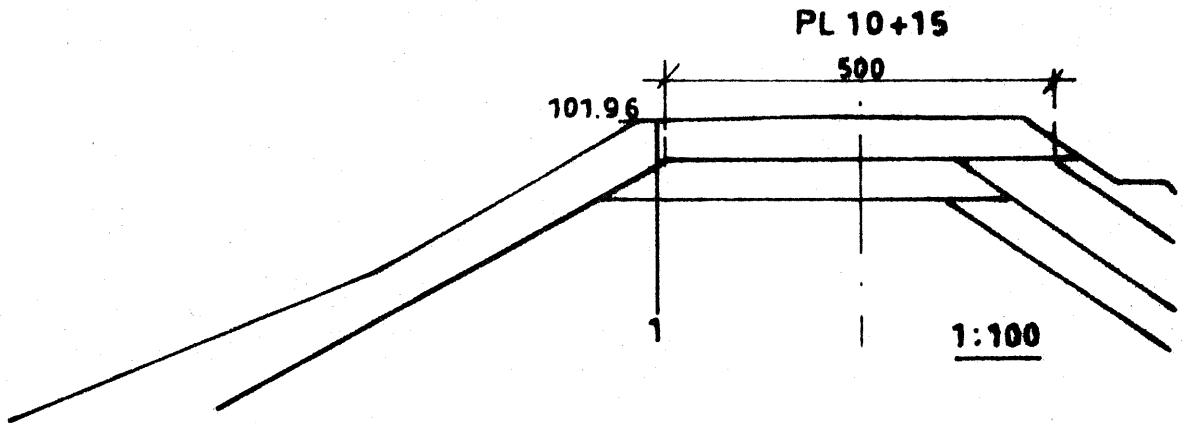
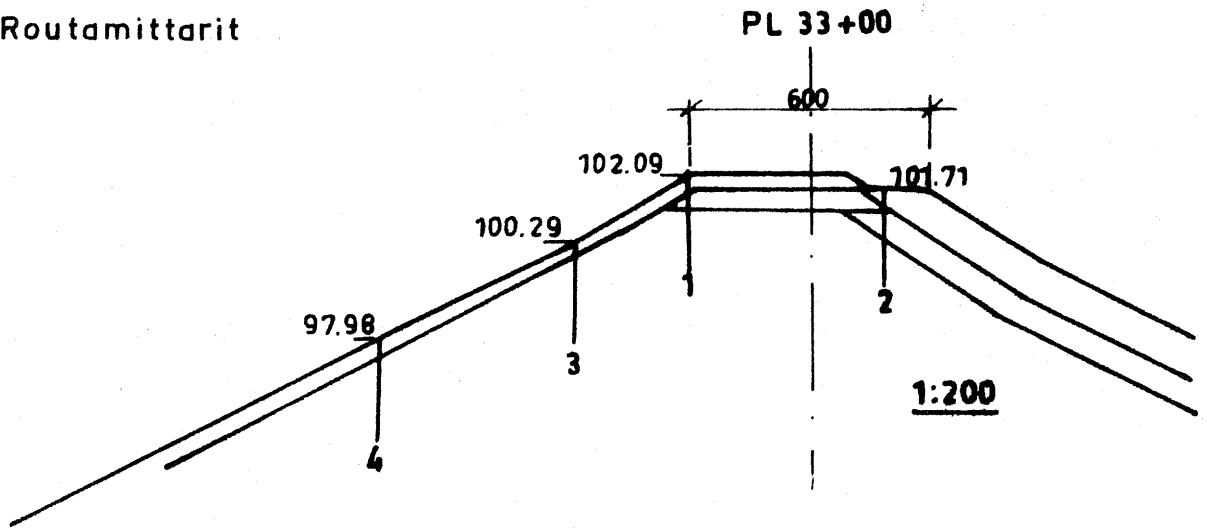
**Vyöhykkeet:**

- 3 Muoviputkialaojan suodatin
- 3a Kivisalaaja
- 4 Pohjasuodatin
- 4a Välisuodatin
- 5 Moreenirunko
- 6 Märän luiskan suodatin
- 7 Kuivan luiskan verhous
- 8 Padon harjan verhous
- 9 Märän luiskan kiviheitoke
- 10 Etuverhous



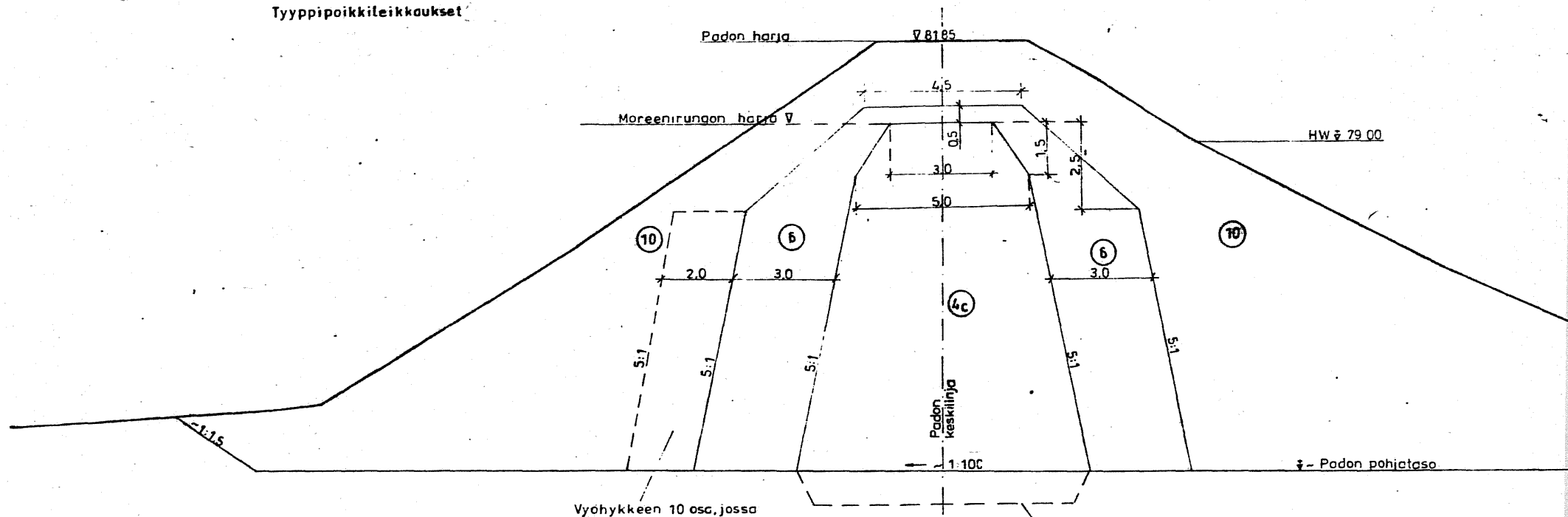
HAUTAPERÄN MAAPATO

Routamittarit



MA

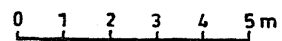
**TULISAAREN MAAPÄTO**  
**Tyyppi-poikkileikkaukset**



Vyöhykkeen 10 os, jossa suurin sallittu kivikoko on  $d=30$  cm

Tiivistesydämen upotuksen tarve selvitetään tyonaikaisilla tutkimuksilla

- ④c Moreenitiivistesydän
- ⑥ Sorasuodatin
- ⑩ Louhos



KALAJÄRVEN MAAPATO PL. 78+00

Elementtimenetelmä:  
reunaehdot, vedenläpäisevyyškertoimet (m/s)  
ekvipotentiaaliviivat

$$k_x = k_y$$

$\nabla 107.20$

kerros n:o  $k_x = 10^{-x}$

1 5.0

2 6.3

3 7

105.50

105.00

104.00

103.00

102.00

101.00

$\nabla HW 105.75$

$L_0$

$S_r$

kiviheitoke

$S_h: h = 105.75$  sorosuođotin

suotoviiva

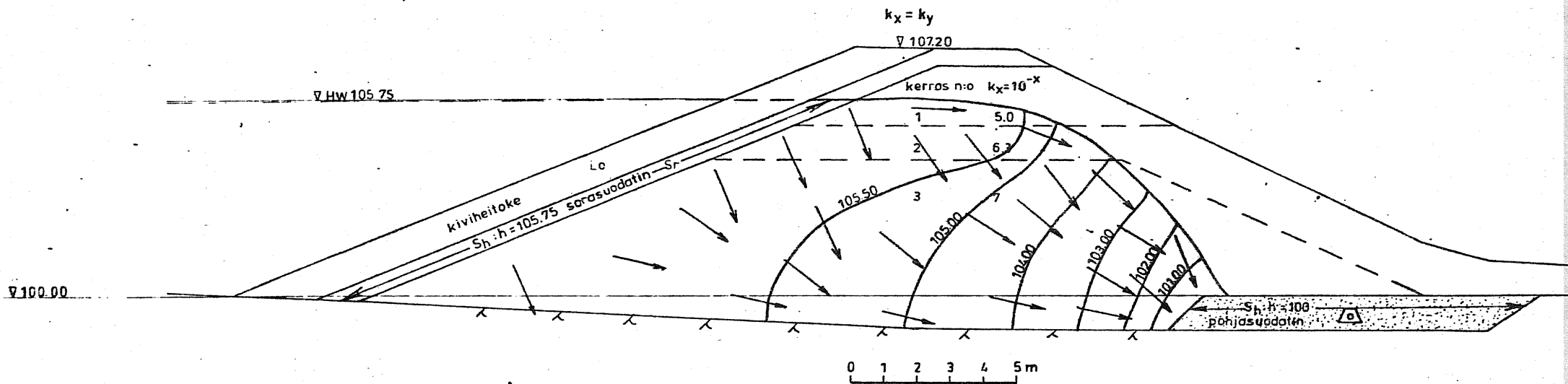
$\nabla 100.00$

$S_h: h = 100$

0 1 2 3 4 5 m

KALAJÄRVEN MAAPATO PL.78+00

Elementtimenetelmä:  
 reunehdot, vedenläpäisevyykskerroimet (m/s)  
 ekvipotentiaaliviivat, nopeusvektorit



KALAJÄRVEN MAAPATO PL. 78+00

Elementtimenetelmä:  
reunaehdot, vedenläpäisyvyydet (m/s)  
ekvipotentiaaliviivat

$k_x = 9 k_y$

▽ 10720

Kerros n:o  $k_x = 10^{-x}$

1 5,0

2 6,3

3 7

suotoviiva

▽ HW 10575

kiviheitoke

$L_0$

$S_h: h = 10575$  sorasuodatin

105.50

105.00

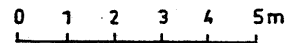
104.00

103.00

102.00

101.00

$S_h: h = 100$   
pohjasuodatin



KALAJÄRVEN MAAPATO PL. 78+00

Elementtimenetelmä:  
 reunaehdot, vedenläpäisevyysskertoimet (m/s)  
 ekvipotentiaaliviivat, nopeusvektorit

