Teknillinen korkeakoulu
Rakennus– ja maanmittaustekniikan osasto
Pohjarakennus ja maamekaniikka

Risto Kuusiniemi

MAAPADON HARJAN ROUTIMINEN JA ROUTASUOJAUKSEN MITOITUS

Tekniikan lisensiaatin tutkintoon liittyvä tutkimustehtävä, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi Espoossa 28.11.1995.

Työn valvoja: Professori Eero Slunga

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO

LISENSIAATINTYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Risto Kuusiniemi

Lisensiaatintyö: Maapadon harjan routiminen ja routasuojauksen mitoitus

Päivämäärä: 28.11.1995 Sivumäärä: 310

Professuuri: Pohjarakennus ja maamekaniikka Koodi: Rak-50

Valvoja: Prof. Eero Slunga

Ohjaaja: Prof. Eero Slunga

Suomessa rakennetut maapadot ovat yleensä tyypiltään joko homogeenisiä maapatoja tai vyöhykemaapatoja, joiden tiivisteosa on moreenia, mutta vyöhykepadoissa on myös käytetty savea tiivisteosan rakentamiseen. Molemmat maalajit ovat routivia. Talven 1978–79 jälkeen havaittiin useilla valtion omistamilla padoilla pitkittäisiä halkeamia padon harjalla. Halkeamien arveltiin johtuvan padon harjaosan routimisesta. Padon kuivavara oli yleensä vain 1,7 – 1,9 metriä. Seuraavana talvena, 1979–80, aloitetuissa roudan syvyyshavainnoissa todettiin, että routa ulottui 0,2 – 0,3 metriä altaan HW-tason alapuolelle. Padoilla suoritetuissa vedenläpäisevyysmittauksissa havaittiin vedenläpäisevyyden kasvaneen padon harjan jäätyneessä vyöhykkeessä.
Tässä työssä käsiteltiin 21 maapadolla yli 10 vuoden aikana tehtyjä routahavaintoja. Padot sijaitsevat eri puolilla Suomea, mutta eniten havaintoja oli valtion omistamilta padoilta Vaasan, Kokkolan ja Oulun vesi- ja ympäristöpiirien alueilta. Vaasan vesi- ja ympäristöpiirissä, Seinäjoella, sijaitsevaan Kyrkösjärven patoon asennettiin routamittareita, lämpötila-antureita ja routanousumittareita. Peräseinäjoella sijaitsevassa Kalajärven padossa ja Nurmossa sijaitsevassa Hirvijärven padossa mitattiin roudan syvyyttä ja lämpötiloja. Muissa padoissa mitattiin vain roudan syvyyttä. Lumen syvyys yleensä mitattiin routamittarin kohdalla. Havaintoaineisto käsitti kaikkiaan yli 6000 roudan syvyyshavaintoa, noin 6000 patorungon lämpötilahavaintoa ja noin 200 patosydämen routanousuhavaintoa.
Kyrkösjärven moreenin lämpöteknisiä ominaisuuksia määritettiin laskentaa varten Oulun yliopiston Rakentamistekniikan osaston geotekniikan laboratoriossa.
Mitattuja padon harjaosan roudan syvyyshavaintoja käsiteltiin tilastollisesti roudan syvyyden ja pakkasmäärän välisen vuorosuhteen selvittämiseksi. Roudan syvyys Kyrkösjärven padon harjalla laskettiin sekä ns. muunnetulla Watzingerin yhtälöllä että FRACS-elementtiohjelmalla ja laskentatuloksia verrattiin havaintotuloksiin. Samoin routanousuhavaintoja käsiteltiin tilastollisesti routanousun ja pakkasmäärän sekä routanousun ja moreenissa mitatun roudan syvyyden välisten vuorosuhteiden selvittämiseksi.
Roudan syvyyttä lumettoman padon harjan keskilinjalla voidaan arvioida yhtälöllä $Z = k \cdot \sqrt{F}$, jossa vuorosuhdekertoimen k arvo on patotyypistä riippuen 1,05 – 1,3. Mitoituspakkasmääränä voidaan käyttää $F = F_{20(31-60)}$ tai $F = F_{10(61-90)}$, jos roudan sallitaan näitä harvemmin esiintyvillä pakkasmäärillä ulottuvan HW-tason alapuolelle. Jos käytetään eristemateriaaleja, niin routasuojauksen mitoitus voidaan riittävällä tarkkuudella tehdä Watzingerin yhtälöllä.
FRACS-elementtiohjelmalla laskettiin roudan etenemistä talven aikana padon harjan keskilinjalla. Laskentatulokset olivat lähinnä mitattuja roudan syvyyksiä silloin, kun moreenin oletettiin olleen täysin veden kyllästämä. Suurin ongelma laskennassa oli lämpöteknisten parametrien ja reunaehtojen valinta.
Maapadon harjan riittävä routasuojaus saadaan rakentamalla kuivavara joko mitoittavan roudan syvyyden suuruiseksi tai käyttämällä padon harjaosassa routaeristeitä.

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND SURVEYING

ABSTRACT OF THE LICENTIATE'S THESIS

Author: Risto Kuusiniemi

Thesis: Frost action on the top of earth dam and design for frost protection

Date: 28.11.1995

Number of pages: 310

Professorship: Soil Mechanics and Foundation Engineering

Code: Rak-50

Supervisor: Prof. Eero Slunga

Instructor: Prof. Eero Slunga

In Finland both homogeneous and zoned earth dams have been constructed. The core material of the dam is usually till, but clay material has also been used in zoned earth dams. Both soil types are frost-susceptible soils. After the winter 1978 – 1979 longitudinal cracks were found in the top of many earth dams. These cracks were assumed to be caused by frost in the top section of the dam. The freeboard had usually varied between 1.7 – 1.9 m. When systematical frost depth measurements were begun in the winter 1979 – 1980 in homogenous earth dams, it was noticed, that at its deepest, the frost penetrated 0.2 – 0.3 m under the HW-level. In the measurements it was found that the permeability had increased just in this freezing zone.

In this study frost depth measurements from 21 earth dams collected over 10 years were examined. The dams are located in different parts of Finland, but a major part of measurements were from dams owned by the state, in the water district offices of Vaasa, Kokkola and Oulu. The earth dam of Kyrkösjärvi, at Seinäjoki, was the most thoroughly instrumented. The frost depth, temperatures in the earth dam with thermocouples installed up to 7 m, and frost heave were measured there. In the earth dam of Kalajärvi, at Peräseinäjoki and in the earth dam of Hirvijärvi, at Nurmo, frost depths and temperatures were measured. In the other dams frost depth was measured only. The depth of snow cover was measured around the frost tubes. The field observations included over 6000 frost depth measurements, about 6000 measurements of dam body temperature and about 200 measurements of frost heave in dam core.

The thermal properties of till used in Kyrkösjärvi dam were determined for calculations at the Laboratory of Soil Mechanics and Foundation Engineering, University of Oulu.

The measured frost depth of the dam core was handled statistically to clear up the correlation of the frost depth and the freezing index. The frost depth in the top of Kyrkösjärvi earth dam was calculated both with the so called modified Watzinger equation and with the FRACS-elementprogram and results were compared with observations. Also, frost heave measurements were handled statistically to clear up the correlation of the frost heave and the freezing index and the frost heave and the frost depth in the till core.

The frost depth in the middle of the top of an earth dam without snow cover can be estimated with the equation $Z = k \cdot \sqrt{F}$, where k is 1.05 – 1.30 depending on the type of the dam. As design freezing index can be used $F = F_{20(31-60)}$ or $F = F_{10(61-90)}$, if freezing is permitted under the HW-level during winters colder than the above mentioned.

If insulation materials are used, the design of the frost protection can be made in sufficiently accurate with the Watzinger equation.

With the FRACS-elementprogram the frost front penetration was calculated in the middle of the top of the earth dam and the results were compared with the field measurements. The results of the calculations were nearest the measurements, when it was assumed that the till was fully saturated. The greatest difficulty in the calculation was to determine the thermal properties of soils and boundary conditions.

Sufficient frost protection for the top of the earth dam can be made by designing the freeboard according to the design frost depth or by using insulation material on the top of the dam.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus liittyy 1970–luvun lopulla vesihallituksessa aloitettuun patoturvallisuuden kehitystyöhön, jonka tuloksena Suomessa tuli 1984 voimaan patoturvallisuuslaki ja asetus sekä vuonna 1985 julkaistiin Patoturvallisuusohjeet.

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan tarkentaa Patoturvallisuusohjeissa esitettyjä maapadon kuivavaran suunnitteluvaatimuksia. Tutkimus on tehty vesi– ja ympäristöhallituksen teknillisessä tutkimustoimistossa.

Työn valvojaa ja tarkastajaa, professori Eero Slungaa kiitän hänen antamistaan neuvoista ja ohjeista sekä työni tarkastamisesta.

Tekn. tri Seppo Saarelaista kiitän hyödyllisistä neuvoista ja ohjeista sekä työni tarkastamisesta.

Vaasan vesi– ja ympäristöpiirissä havaintolaitteiden asentamisesta patoihin ja luotettavasta havainnoinnista vastuussa olleelle rkm. Jouko Nisulalle esitän suuret kiitokset.

Kokkolan vesi– ja ympäristöpiirissä routahavainnoista on ollut vastuussa rkm. Jorma Vääräniemi.

Yhteiset kiitokset muille tutkimukseen osallistuneille vesi– ja ympäristöpiireille routahavaintojen tekemisestä sekä Kemijoki Oy:lle Petäjäskosken ja Vajukosken routahavaintojen luovuttamisesta tutkimuskäyttöön.

Havaintoaineiston käsittelyssä käytettyjen ATK–ohjelmien laadinnasta esitän erityiset kiitokset DI Markku Liponkoskelle.

Hydrologi Kirsti Granlund tulkitsi maan vesipitoisuuden vaihtelun selvittämiseksi Kyrkösjärven padolla roudan sulamisvaiheessa tehtyjen radiometristen mittausten tulokset.

Erityiset kiitokset esitän tekn.tri Daichao Sheng`ille hänen käyttööni luovuttamasta FRACS–elementtiohjelmasta.

Lähimmät esimieheni toimistopäällikkö Hannu Laikari ja tekn.lis. Erkki Loukola ovat kannustaneet tutkimustyön suorittamista.

Päivi Laaksonen on tehnyt tutkimuksen puhtaaksikirjoitustyön.

Lopuksi kiitän yhteisesti kaikkia niitä henkilöitä, jotka eri tavoin ovat olleet vaikuttamassa tämän työn valmistumiseen.

Helsingissä marraskuussa 1995.

Risto Kuusiniemi

MERKINNÄT

A_0	kerroin
A_1	eksponentti
C_v	tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
C_{vu}	sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
C_{vf}	jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
C_{wv}	veden tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
C_{ice}	jään tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
D	tiiviysaste, % (Parannettu Proctor)
E	maalämpö, h^0C, Kh
F	pakkasmäärä,h^0C, Kh
F_m	maanpinnan pakkasmäärä,,h^0C
F_i	ilman pakkasmäärä,h^0C
F_2	keskimäärin kerran 2 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä, h^0C
F_5	keskimäärin kerran 5 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä, h^0C
F_{10}	keskimäärin kerran 10 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä, h^0C
F_{20}	keskimäärin kerran 20 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä, h^0C
G	maan lämpötilagradientti, $^0C/m$
HP	homogeeninen maapato
HW	ylivesipinta, m
K_F	kerroin
K	kerroin
Ke	Kerstenin luku
L	olomuodonmuutoslämpö, J/m^3
L_S	maan olomuodonmuutoslämpö eli jäätymislämpö, J/m^3
L_n	maakerroksen n jäätymislämpö, Wh/m^3
L	siiviläosan pituus, m
Q	lämpömäärä, J
R	havaintoputken säde, m
R_p	pintavastus, Km^2/W
S	ominaispinta–ala, m^2/g, m^2/kg
S_r	kyllästysaste
T_1	lämpötila, °C
T_2	lämpötila, °C
T_d	vuorokauden keskilämpötila, ^0C
T_m	kuukauden keskilämpötila, ^0C
VP	vyöhykepato
Z	roudan syvyys, m
Z_n	jäätyneen kerroksen n paksuus, m
ΔT	lämpötilanmuutos, K
Ω	pakkasvastus, h^0C
Θ	lämpötila, ^0C
a,b,c ja d	vakioita
α ja β	vakioita
c	ominaislämpö, kJ/kgK
d_e	lämpöeristeen paksuus, m
g	maan lämpötilagradientti, °C/m
h	routanousu, mm
h_1	veden korkeus havaintoputkessa

h_2	veden korkeus havaintoputkessa
k	vuorosuhdekerroin
k	vedenläpäisevyyskerroin, m/s
k_x	vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin, m/s
k_y	pystysuora vedenläpäisevyyskerroin, m/s
l	olomuodonmuutoslämpö, J/kg
l_w	veden olomuodonmuutoslämpö, J/kg
m	massa, kg
m_e	lämpöeristeen lämmönvastus, m^2K/W
n	huokoisuus
n	maakerrosten lukumäärä
q	kvartsipitoisuus
r	putken säde
t	aika
t_1 ja t_2	aika, min
t_n	vuoden keskilämpötila, °C
w	vesipitoisuus, paino–%
w_{til}	vesipitoisuus, til.–%
w_{opt}	optimivesipitoisuus
w_t	suhteellinen kokonaisvesipitoisuus
w_u	suhteellinen jäätymättömän veden määrä
λ	lämmönjohtavuus, W/mK
λ^0	kuivan maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ^1	vedellä kyllästetyn maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_e	lämpöeristeen lämmönjohtavuus, W/mK
λ_f	jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_{ice}	jään lämmönjohtavuus, W/mK
λ_{lab}	laboratoriossa määritetty moreenin lämmönjohtavuus, W/mK
λ_q	kvartsin lämmönjohtavuus, W/mK
λ_{SU}	Sundbergin käyristä määritetty maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_r	"jäännöksen" lämmönjohtavuus, W/mK
λ_u	sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_w	veden lämmönjohtavuus, W/mK
ρ	tiheys, kg/m^3
ρ_d	kuivatiheys, kg/m^3
ρ_s	kiintotiheys, kg/m^3
ρ_w	veden tiheys, kg/m^3
ρ_{ice}	jään tiheys, kg/m^3
γ_d	kuivatilavuuspaino, kN/m^3

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ		2
ABSTRACT		3
ALKUSANAT		4
MERKINNÄT		5
SISÄLLYS		7
1	JOHDANTO	11
1.1	Tutkimuksen tausta	11
1.2	Tutkimusongelma	11
1.3	Tutkimuksen tavoitteet	11
2	AIKAISEMMAT MAAPATOJEN ROUTATUTKIMUKSET	14
3	MAAPADON KUIVAVARAN MITOITUSVAATIMUKSET POHJOISMAISSA	16
3.1	Kuivavaran mitoitus Suomessa	16
3.2	Kuivavaran mitoitus Ruotsissa	16
3.3	Kuivavaran mitoitus Norjassa	17
4	ROUDAN VAIKUTUKSET MAASSA JA MAAN LÄMPÖTEKNISET OMINAISUUDET	18
4.1	Roudan vaikutukset maassa	18
4.1.1	Routimisilmiö	18
4.1.2	Maan routivuus	18
4.1.3	Routanousu	20
4.1.4	Sulamispehmeneminen	20
4.2	Maan lämpötekniset ominaisuudet	21
4.2.1	Lämmön siirtyminen maassa	21
4.2.2	Lämmönjohtavuus	23
4.2.21	Maan lämmönjohtavuus	23
4.2.22	Veden, jään ja lumen lämmönjohtavuus	24
4.2.23	Maan lämmönjohtavuus Kerstenin menetelmällä	25
4.2.24	Maan lämmönjohtavuus Johansenin menetelmällä	28
4.2.25	Maan lämmönjohtavuus Sundbergin menetelmällä	32
4.2.26	Maan lämmönjohtavuus venäläisen ikiroutanormin perusteella	34
4.2.3	Ominaislämpö	35
4.2.4	Maan tilavuuslämpökapasiteetti	36
4.2.5	Jäätymislämpö	37
5	HAVAINNOT JA HAVAINTOMENETELMÄT	38
5.1	Ilman lämpötila ja pakkasmäärä	38
5.2	Roudan syvyyden mittaus	39
5.3	Lumen syvyys	42
5.4	Patorakenteen lämpötilahavainnot	42

5.5	Routanousuhavainnot	43
5.6	Padon harjaosan vedenläpäisevyys	44
5.7	Vesipitoisuuden määritys, in situ	47
6	TUTKITTUJEN PATOJEN RAKENTEET JA ROUDAN MAKSIMISYVYYDET	61
6.1	Maarian pato	61
6.2	Raision tekojärven padot(Haunisten pato)	61
6.3	Silvolan tekojärven maapadot	62
6.4	Puntarikosken voimalaitospato	62
6.5	Kuokkastenkosken maapato	63
6.6	Kuurnan voimalaitospato	63
6.7	Liikapuron altaan maapato	63
6.8	Kivi- ja Levalammen altaan maapato	65
6.9	Hirvijärven tekojärven maapato	66
6.10	Varpulan altaan maapato	68
6.11	Kalajärven tekojärven maapato	69
6.12	Kyrkösjärven tekojärven maapato	71
6.13	Säläsjärven maapato	73
6.14	Hipin altaan maapato	73
6.15	Hautaperän tekojärven maapato	74
6.16	Patanan altaan maapato	75
6.17	Venetjoen altaan maapato	77
6.18	Kaitforsin maapato	79
6.19	Uljuan tekojärven maapadot	81
6.19.1	Tulisaaren maapato	81
6.19.2	Arkkusaaren maapato	83
6.20	Petäjäskosken voimalaitospadot	85
6.21	Vajukosken voimalaitospadot	85
6.21.1	Yleistä	85
6.21.2	Itärannan maapato	87
6.21.3	Länsirannan maapato	88
7	PADOILLA HAVAITUT ROUTAVAURIOT	90
7.1	Yleistä	90
7.2	Uljua, Tulisaaren pato	90
7.3	Hautaperän pato	90
7.4	Vaasan vesi- ja ympäristöpiirin kunnossapitämät padot	91
7.5	Kokkolan vesi- ja ympäristöpiirin kunnossapitämät padot	92
7.6	Petäjäskosken ja Vajukosken padot	93
7.6	Patovalvontaviranomaisen ohjeita	93
8	LABORATORIOKOKEET JA ROUDAN SYVYYDEN ARVIOIMISESSA KÄYTETYT OMINAISUUSARVOT	94
8.1	Yleistä	94
8.2	Moreenin routivuuden määritys	96
8.2.1	Ominaispinta-ala	96
8.2.2	Kapillaarisuus	96
8.2.3	Routanousukoe	97

8.2.4	Kalajärven ja Kyrkösjärven moreeninäytteiden routivuus	98
8.3	Moreenin lämpöteknisten ominaisuuksien määritys	99
8.3.1	Lämmönjohtavuuden määritys lämmönjohtavuussondilla	99
8.3.2	Jäätymättömän vesipitoisuuden määrittäminen jäätyneestä näytteestä	102
8.4	Roudan syvyyden laskemisessa käytetyt ominaisuusarvot	104
9	TALVIKAUSIEN SÄÄOLOSUHTEET VUOSINA 1979 - 1991	107
10	ROUDAN SYVYYDEN ARVIOINTI MAAPADOSSA	112
10.1	Yleistä	112
10.2	Roudan syvyyden mallintaminen roudan syvyyshavaintojen perusteella	112
10.2.1	Yleistä	112
10.2.2	Etelä–Suomi	113
10.2.3	Itä–Suomi	114
10.2.4	Etelä–Pohjanmaa	114
10.2.5	Keski–Pohjanmaa	115
10.2.6	Pohjois–Pohjanmaa	119
10.2.7	Lappi	120
10.2.8	Yhteenveto regressiomallien käytöstä	120
10.3	Roudan syvyyden likimääräinen mallintaminen kerroksellisessa rakenteessa	122
10.3.1	Yleistä	122
10.3.2	Lämpötilagradientin määrittäminen	123
10.3.3	Watzingerin yhtälön PC–sovellus	124
10.3.4	Suoritetut laskennat	126
10.4	Numeeriset menetelmät	131
10.4.1	Yleistä	131
10.4.2	FRACS–laskentaohjelma	131
10.4.3	Suoritetut elementtilaskennat	132
11	ROUTANOUSUN ARVIOIMINEN ROUTANOUSUHAVAINTOJEN PERUSTEELLA	140
12	MAAPADON HARJAN ROUTASUOJAUS	143
12.1	Patoturvallisuusohjeiden vaatimukset	143
12.2	Roudan syvyyden arviointi	143
12.3	Maamateriaalien käyttö routasuojauksessa	144
12.4	Eristemateriaalien käyttö routasuojauksessa	145
13	YHTEENVETO JA SUOSITUKSET	148
13.1	Yleistä	148
13.2	Talvikausien sää havaintoaikana	148
13.3	Roudan syvyyshavainnot	148
13.4	Lumihavainnot	149
13.5	Routanousuhavainnot	149
13.6	Patorakenteen lämpötilahavainnot	149
13.7	Patomateriaalien ominaisuudet	149

13.8 Vedenläpäisevyyden mittaus padolla 150
13.9 Vesipitoisuuden muutokset routarajalla padon harjalla 151
13.10 Roudan syvyyden arvioiminen routahavaintojen perusteella 151
13.11 Roudan syvyyden arvioiminen Watzingerin yhtälöllä 152
13.12 Roudan syvyyden laskeminen elementtimenetelmällä 152
13.13 Routanousun arvioiminen 152
13.14 Suositus maapadon kuivavaran mitoittamiseksi 152

KIRJALLISUUSLUETTELO 154

LIITTEET 159

1 Maanpinta ja rakennekerrosten alapinta routamittareiden kohdalla
2 Maapadoissa mitatut roudan maksimisyvyydet
3 Routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa
4 Lumen ja roudan syvyyshavaintoja tutkituissa padoissa sekä talven pakkasmäärä
5 Routanousu- ja roudansyvyyshavaintoja tutkituissa padoissa sekä talven pakkasmäärä
6 Patorakenteen lämpötilamittausten tuloksia
7 Yhteenveto patojen käyttöajan talvien pakkasten voimakkuudesta
8 Regressioyhtälöillä lasketut roudansyvyydet padon harjalla eri pakkasmäärillä sekä suurimmat mitatut roudansyvyydet vastaavilla pakkasmäärillä
9 Maalajien lämmönjohtavuus Sundbergin mitoituskäyrillä
10 Esimerkki FRACS-elementtiohjelman laskennan lähtötiedoista

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomessa alkoi heti sodan loputtua 1945 voimakas jälleenrakennuskausi, johon liittyi vesivoimalaitosten rakentaminen sähkönsaannin varmistamiseksi. Erityisesti 1950- ja 1960-luvuilla rakennettiin pääasiassa Oulujokeen ja Kemijokeen voimalaitospatoja, joissa säännöstely- ja voimalaitosrakenteet olivat betonipatoja ja loppuosa jokiuoman sulkevasta padosta ja reunapadot olivat maapatoja.

Patoaltaiden rakentaminen tulvasäännöstelyn tarpeisiin alkoi 1960-luvun alussa ja jatkui yhtäjaksoisesti lähes 20 vuotta. Patojen rakennuttajana oli Pohjanmaalla yleensä Suomen valtio ja Lapissa Kemijoki Oy. Näiden tulvasuojelualtaiden patoaminen edellytti jopa yli 10 kilometriä pitkien maapatojen rakentamista. Suurin osa altaista sijaitsee Etelä- ja Keski-Pohjanmaalla.

Suomessa maapadot olivat tyypiltään joko homogeenisiä maapatoja tai vyöhyke-maapatoja, joiden tiivisteosa oli rakennettu useimmiten hiekkamoreenista, mutta vyöhykepadoissa oli käytetty myös kuivakuorisavea. Molemmat maalajit olivat routivia.

Talven 1978 – 79 jälkeen havaittiin useilla valtion omistamilla padoilla pitkittäisiä halkeamia padon harjalla. Halkeamien arveltiin johtuvan padon harjaosan routimisesta. Padon kuivavara oli yleensä 1,7 – 1,9 metriä. Koska maapadon harjan roudan syvyyksistä oli olemassa vain vähän mittaustuloksia ja routimisen aiheuttama vaara padon vakavuudelle oli ilmeinen, niin aloitettiin tarkemmat tutkimukset.

1.2 Tutkimusongelma

Seuraavana talvena, 1979-80, aloitetuissa roudan syvyyshavainnoissa todettiin, että routa ulottui 0,2 – 0,3 metriä altaan ylävesipinnan eli HW-tason alapuolelle. Roudan syvyyttä mitattiin Seinäjoen ympäristössä sijaitsevissa , valtion omistamissa, homogeenisissä maapadoissa. Padoilla suoritetuissa vedenläpäisevyysmittauksissa havaittiin vedenläpäisevyyden kasvaneen padon harjan jäätyneessä vyöhykkeessä.

Jos padon kuivavara on pienempi kuin roudan syvyys ja tiivistesydän on rakennettu routivasta maasta, niin routiminen voi lisätä vedenläpäisevyyttä. Vedenläpäisevyyden kasvu voi johtaa patoluiskan sortumiseen sisäisen eroosion seurauksena. Tämän ilmiön ehkäisemiseksi padon kuivavara olisi mitoitettava niin suureksi, että routa vain ankarimpina talvina voi ulottua HW-tasolle tai sen alapuolelle.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää eräiden käytössä olevien roudan syvyyden laskentamenetelmien soveltuvuutta maapadon harjan roudan syvyyden arvioimiseen ja kuivavaran mitoitukseen sekä esittää vaihtoehtoisia harjan routasuojaustapoja.

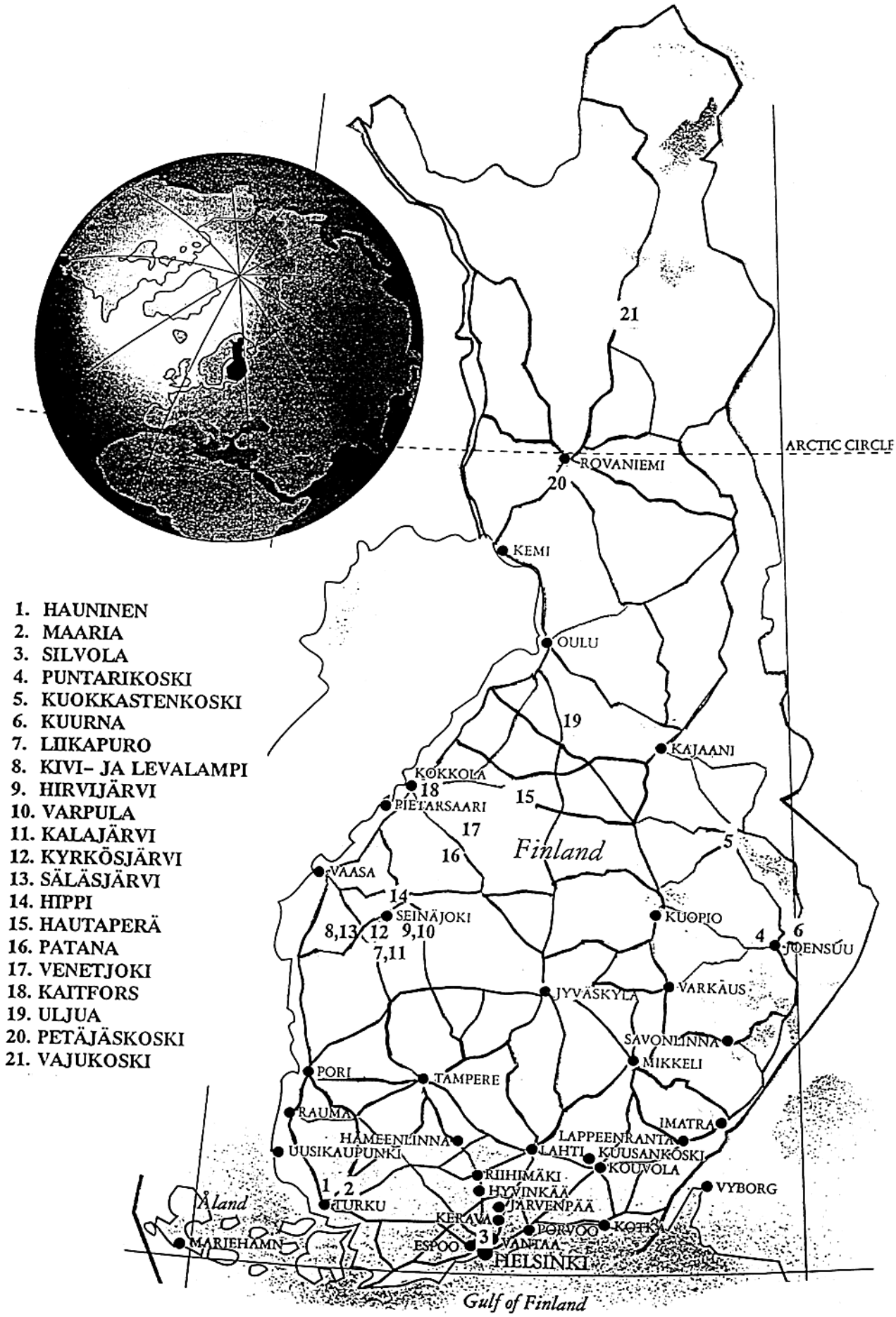
Tavoitteen saavuttamiseksi tässä työssä käsiteltiin 21 maapadolla yli 10 vuoden aikana tehtyjä routahavaintoja maapadon harjan roudan syvyyden ja harjan routimisen aiheuttamien vaurioiden selvittämiseksi. Tutkimuksen kohteena olleet padot sijaitsivat eri puolilla Suomea, mutta eniten oli routahavaintoja valtion omistamilta padoilta Vaasan, Kokkolan ja Oulun vesi- ja ympäristöpiirien alueilta. Kuvassa 1 on esitetty patojen sijainti. Vaasan vesi- ja ympäristöpiirissä, Seinäjoella, sijaitsevaan Kyrkösjärven patoon asennettiin routamittareita, lämpötila-antureita ja routanousumittareita. Peräseinäjoella sijaitsevaan Kalajärven patoon ja Nurmossa sijaitsevaan Hirvijärven patoon asennettiin routamittareiden lisäksi myös lämpötila-antureita ja muissa padoissa mitattiin vain roudan syvyyksiä.

Pohjois-Suomessa sijaitsevien maapatojen roudan syvyyksistä saatiin käyttöön Kemijoki Oy:n padoillaan suorittamia havaintoja.

Hirvijärven, Kalajärven, Kyrkösjärven ja Liikapuron patojen harjaosan routimisvyöhykkeessä 1980-luvun alussa ja 1993 mitattuja vedenläpäisevyyden arvoja verrattiin rakentamisen aikaisiin tarkkailutuloksiin padon harjan mahdollisen routimisen aiheuttamisen muutoksien selvittämiseksi.

Kyrkösjärven padossa mitattiin radiometrisellä luotauksella routimisvyöhykkeen tilavuusvesipitoisuuden muutoksia roudan sulamisvaiheesta loppukesään asti routimisen aiheuttamien vesipitoisuuden muutosten selvittämiseksi routarajalla.

Kalajärven ja Kyrkösjärven maapatojen moreeninäytteistä määritettiin routivuus- ja lämpötekniset ominaisuudet laboratoriossa roudan syvyyslaskelmia varten.



Kuva 1. Tutkittujen maapatojen sijainti

2 AIKAISEMMAT MAAPATOJEN ROUTATUTKIMUKSET

Maapatojen harjan roudan syvyyden arvioimiseen ja routimiseen liittyviä tutkimuksia on tehty suhteellisen vähän. Sen sijaan runsaasti on tutkittu routaa luonnon maassa ja muissa maarakenteissa kuten teissä, rautateissä ja talojen perustuksissa (Skaven–Haug 1972, Tsytovich 1975, Jumikis 1977 ja Andersland & Anderson 1978). Suomessa on viime aikoina tutkittu maamateriaalien routimiseen ja routanousuun vaikuttavia tekijöitä (Kujala 1991) sekä roudan syvyyden ja routanousun laskentamenetelmiä (Saarelainen 1992). Maan ja kallion lämpöteknisiä ominaisuuksia ja niiden määritysmenetelmiä ovat tutkineet mm. Farouki (1981) ja Sundberg (1988). Norjassa 1970-luvulla toteutetun mittavan routaprojektin tuloksien yhteenvedossa esitetään tarkat suunnitteluohjeet eri rakenteiden routamitoitukselle (Frost i Jord Nr. 17 1976). Myöhemmin ovat mm. Nordal & Refsdal (1989) käsitelleet routasuojausten suunnittelua.

Erityisen vähän on tutkittu toistuvan jäätymisen ja sulamisen vaikutusta tiivistetyn moreenin vedenläpäisevyyteen ja routanousun suuruuteen; sen sijaan näitä vaikutuksia on tutkittu enemmän savella ja siltillä (Wong & Haug 1991, Othman & Benson 1993). Tehtyjen laboratoriokokeiden mukaan moreenin, saven ja siltin vedenläpäisevyys voi kasvaa jopa 10 – 100 kertaiseksi 3 – 5 jäätymis–sulamissyklin aikana. Hiekka-bentoniittiseoksella on tehty eri bentoniittipitoisuuksilla (4,5 – 25 % bentoniittia) jäätymis–sulamiskokeita, joiden tuloksena oli, että hiekka–bentoniittiseoksen vedenläpäisevyys ei kasvanut eikä muitakaan vaurioita todettu näytteissä (Wong & Haug 1991).

Suomessa on tutkittu sulamiskonsolidaation vaikutusta routarajan alapuolisen saven geoteknisiin ominaisuuksiin ja saven rakenteeseen (Vähäaho & Ryhänen 1989). Tutkimuksen mukaan jäätymis–sulamissyklin seurauksena savi ikäänkuin ylikonsolidoituu ja lisäkuormitusten aiheuttamat painumat jäävät suuruusluokaltaan kolmanteen osaan jäätymättömän normaalikonsolidoituneen savikerroksen painumiin verrattuna. Jäätymisen ja sulamisen yhteydessä tapahtuneet fysikaalis–kemialliset ilmiöt aiheuttivat tutkimuksen mukaan pysyviä muutoksia saven rakenteeseen.Sulamiskonsolidaation jälkeen savi muistuttaa ominaisuuksiltaan kuivakuorisavea.

Roudan syvyyden laskemiseksi sekä routaantumis– että sulamisvaiheessa on Ruotsissa kehitetty elementtilaskentaohjelma (Sheng 1990), jota käytettiin yhtenä menetelmänä maapadon routaantumissyvyyden arviointiin tässä tutkimuksessa.

Maapatojen rakentamiseen liittyvien routaongelmien tutkimukset voitiin jakaa ainakin kolmeen ryhmään:
–maapatojen rakentaminen talvella,
–maapatojen rakentaminen ikirouta–alueelle ja
–maapatojen harjaosan routiminen ja sen aiheuttamat vauriot.

Koska maapatojen rakennuskausi on lyhyt, kevättulvan ja syksyn pakkasten välinen aika, on Suomessakin tehty kokeiluja työkauden jatkamiseksi talvikaudelle. Ylä-Tuloman maapatoa rakennettaessa kokeiltiin moreenisen tiivisteosan rakentamista talvella veteen täyttämällä (Arhippainen 1969). Maapatojen talvirakentamista,lähinnä tiivistämistyön onnistumista, on tutkittu Hirvijärven padossa (Kalliomäki 1970). Lyhyitä maapato–osuuksia on myöhemmin rakennettu onnistuneesti talvella, kun on huolehdittu, että moreeni ei missään työvaiheessa pääse jäätymään.

Maapatojen rakentamisessa ikirouta–alueelle esiin tulevia erityisongelmia ja suunnitteluperiaatteita ovat käsitelleet mm. Jumikis (1977), Tsytovich (1975), Johnston (1969), Brown & Johnston (1970), Keil ym. (1973), Smith (1983), Gill & Brew (1982) sekä Sayles (1987).

Tiivisterakenteiden kuten maapatojen tai kanavaluiskien routaantumiseen liittyvät tutkimukset voidaan jakaa kahteen ryhmään jäätymisolosuhteiden mukaan, suljetun ja avoimen tilan jäätymiseen. Maan jäätyminen suljetussa tilassa tarkoittaa, että jäätymisen aikana ei jäätymisvyöhykkeeseen tule huokosveden lisäksi muuta vettä, kun taas avoimessa tilassa jäätymisvyöhykkeeseen on mahdollisuus tulla lisävettä.

Suljetun tilan jäätymiseen ei ole kiinnitetty kovin paljon huomiota, koska siitä ei yleensä aiheudu vahingollista routanousua. Esimerkiksi maapatotyön ollessa keskeytettynä talvella on kyseessä suljetun tilan jäätyminen. USA:ssa tehdyssä tutkimuksessa on selvitetty jäätymisen vaikutusta tiivisterakenteen toimivuuteen (Jones 1981)

Maapadon harjaosan moreenin routaantumista selvitettiin Kanadassa James Bay vesivoimaprojektin yhteydessä (Parè ym. 1978). Tutkimuksissa mitattiin roudan syvyyksiä padoissa, selvitettiin padolla ja laboratoriossa moreenin vedenläpäisevyyttä, tehtiin moreenille jäätymis– ja sulamiskokeita ja pyrittiin määrittämään moreenin lämmönjohtavuus.

Suomessa on tutkittu maapatojen routimista pääasiassa vesi– ja ympäristöhallinnon padoissa yli 10 vuoden ajan (Susimaa 1981, Helander & Slunga 1983, Kuusiniemi 1985 ja 1989).

Kemijoki Oy:n padoissa on tutkittu lähinnä maatutkan soveltuvuutta roudan syvyyden mittaukseen. Maatutkalla olisi mahdollista selvittää roudan syvyys koko padon pituudelta, kun routamittareilla saadaan selville roudan syvyys vain mittauspisteessä. Tutkimuksen mukaan tarvittaisiin tarkempaa tietoa jäätyneen maan dielektrisyysvakion arvosta ja siihen vaikuttavista tekijöistä, jotta maatutkamittausten tarkkuutta saataisiin parannettua (Auvinen 1990).

Imatran Voima Oy:ssä tehdyssä maapatojen kunnon arviointiselvityksessä (Leskelä 1992) on selvitetty mm. maapatojen ikääntymiseen vaikuttavia tekijöitä lähinnä roudan osalta. Tutkimusraportissa todetaan, että roudan tunkeutuminen maapatoon voidaan ennakoida riittävällä tarkkuudella olemassa olevia kokemusperäisiä kaavoja käyttäen. Tutkimusraportin mukaan roudan syvyyden mittaustarkkuus maatutkalla oli suuruusluokkaa 0,1 – 0,4 m.

3 MAAPADON KUIVAVARAN MITOITUSVAATIMUKSET POHJOISMAISSA

3.1 Kuivavaran mitoitus Suomessa

Suomessa maapadon kuivavaran suunnitteluvaatimukset on esitetty vuonna 1991 julkaistuissa patoturvallisuusohjeissa (Vesi- ja ympäristöhallitus, 1991). Patoturvallisuusohjeiden liitteen 13/1 kohdassa 1.52 esitetään seuraavia vaatimuksia:
" N- ja P-patojen kuivavara (padon harjan ja HW-tason välinen ero) määräytyy HW:n aikaisen suurimman aallonkorkeuden perusteella. Kuivavara on oltava vähintään kaksi kertaa suurimman aallon korkeus. Aallon korkeus voidaan alustavasti laskea yksinomaan vapaan vesialueen pituuden perusteella. Tarkemmassa mitoituksessa otetaan huomioon vallitsevien tuulten suunta, kesto ja nopeus.

Kuivavaran on kuitenkin aina oltava vähintään kerran kymmenessä vuodessa toistuvan pakkasmäärän aiheuttaman roudan syvyyden suuruinen (yleensä kuivavaran määräävä tekijä).

O-padoissa kuivavara määräytyy vastaavasti suurimman aallonkorkeuden tai kerran viidessä vuodessa toistuvan pakkasmäärän aiheuttaman routasyvyyden perusteella."

3.2 Kuivavaran mitoitus Ruotsissa

Ruotsissa noudatettuja maapadon kuivavaran suunnitteluvaatimuksia on esitetty Vattenfallin vuonna 1988 julkaisemassa kirjassa "Jord- och fyllningsdammar" (Vattenfall, 1988).

Kirjan tiivistesydämen suunnittelua käsittelevässä kohdassa 6.9 esitetään, että **jos tiivistesydän rakennetaan routivasta materiaalista kuten moreenista, pitää se peittää vähintään 2 metrin kerroksella routimatonta materiaalia.** Lisäksi pitää käyttää silloin, kun se on mahdollista, tiivistesydämen HW-tason yläpuolisen osan rakentamiseen mieluummin hiekkamoreenia kuin silttimoreenia.

Tärkeimpien patojen harja suojataan pommituksia vastaan paksulla lohkarekerroksella, jonka alle voidaan laittaa vielä teräsponttiseinä ylimääräiseksi suojaksi pommeja ja ylivirtausta vastaan.

Kirjan kohdassa 6.10 käsitellään tarkemmin kuivavaran mitoitusta. Kuivavaralla tarkoitetaan altaan korkeimman yliveden ja padon harjan välistä korkeutta. Korkein ylivesi tarkoittaa yleensä 1 metrin ylipadotusta, jolla on varauduttu suuriin tulvavirtaamiin, tuulen aiheuttamiin vedenpinnan nousuihin tai luukkuvaurioihin.

Padon kuivavaran on oltava riittävä estämään ylivirtaus myös ääriolosuhteissa. Riittävä kuivavara määritetään sekä korkeimman ylivesipinnan että luiskaan murtuvien aaltojen vaikutuskorkeuden avulla. Murtuvien aaltojen vaikutuskorkeus luiskassa riippuu luiskaverhouksen materiaalista ja määritetään ylivesipinnasta seuraavasti:
- kiviverhous vyöhykepadossa, jolloin aaltojen vaikutuskorkeus on 2 kertaa merkitsevä aallonkorkeus,

– aseteltu kiviverhous ja suodatinkerros maapadossa, jolloin aaltojen vaikutuskorkeus on 3 kertaa merkitsevä aallonkorkeus ja
– betoni tai asfaltti, jolloin aaltojen vaikutuskorkeus on 4 – 5 kertaa merkitsevä aallonkorkeus.

Yleisenä ohjeena kuivavaran suuruudelle vyöhykepadoilla, joiden tiivistesydän on moreenia, on vähintään 3 metriä, mutta ei kuitenkaan vähemmän kuin aaltojen vaikutuskorkeus yliveden aikana. Vyöhykepadoilla, joiden tiivisteosa on betonia tai asfalttia, kuivavara voi olla pienempi, mutta kuitenkin vähintään 1 metri yli korkeimman ylivesipinnan.

Suurempi kuivavara parantaa padon varmuutta routa– ja ylihuuhtoutumisvaurioiden varalta. Lisäkuormitus tiivistesydämen päällä vähentää myös tiivistesydämen yläosan halkeiluvaaraa. Koska suuremmille padoille vaaditaan harjalle louhekerros pommituksia vastaan, niin padon harja on pikkupatoja lukuunottamatta useimmiten 3 – 6 metriä altaan padotuskorkeutta ylempänä.

Maapato(homogeeninen) vaatii yleensä hydrologiseen mitoitukseen liittyvistä epävarmuustekijöistä johtuen suurempaa varmuutta ylivirtauksen suhteen ja siten myös suurempaa kuivavaraa kuin vyöhykepato.

Vyöhykepadoissa moreenitiivistesydämen yläpinnan on oltava vähintään 0,5 metriä korkeinta ylivesipintaa ylempänä.

3.3 Kuivavaran mitoitus Norjassa

Norjassa 1981 julkaistujen patojen suunnittelu–, rakentamis– ja käyttömääräysten englanninkielinen versio valmistui 1986 (The Norwegian Regulations for Planning, Construction and Operation of Dams). Määräykset sisältävät kaksi osaa, "I Määräykset" ja "II Ohjeet ja suositukset".

Määräysten kappaleessa 9. "Maapatojen suunnittelu ja rakentaminen" kohdassa 9.7 padon harjalle esitetään vaatimuksena, että padon ylempien osien pitää kestää roudan aiheuttamat vaikutukset.
Kuivavaran on oltava riittävä estämään veden loiskuminen patoharjan yli suunnitellulla tulvavedenpinnan korkeudella.
Padoissa, joissa on keskeinen tiivistesydän, on tiivistesydämen yläpinta oltava vähintään 0,5 metriä suunnitellun vesipinnan yläpuolella.

Yksityiskohtaisempia ohjeita padon harjaosan suunnittelua varten annetaan ohjeissa ja suosituksissa, joiden kohdassa 9.7 käsitellään padon harjan eri rakenneosien mittoja ja siinä todetaan myös seuraavaa:
"Roudan haitallisten vaikutusten välttämiseksi moreenista tai muusta routivasta materiaalista tehty padon tiivistesydän on peitettävä vähintään 2 metrin paksuisella routimattomalla maakerroksella."
Kohdassa 9.9 käsitellään kuivavaraa ja todetaan, että moreenisydänpadon kuivavaran on oltava vähintään 2,5 metriä suunniteltuun tulvavesipintaan nähden.
Jos maapadon tiivistesydän on tehty esimerkiksi betonista tai asfaltista, on kuivavaran oltava vähintään 1 m.

4 ROUDAN VAIKUTUKSET MAASSA JA MAAN LÄMPÖTEKNISET OMINAISUUDET

4.1 Roudan vaikutukset maassa

4.1.1 Routimisilmiö

Kun maan lämpötila laskee alle 0 ^{0}C:n, niin maan huokosissa oleva vesi alkaa jäätyä eli maa alkaa routaantua. Routa on maassa olevan veden jäätymisen kovettama maakerros. Routaantumisen seurauksena voi maakerroksen tilavuus kasvaa eli maa voi routia seuraavin edellytyksin
- maa on routivaa,
- maa jäätyy ja
- jäätymisvyöhykkeessä on tai siihen voi kulkeutua vettä.

Yleensä maakerroksen huokosissa olevan veden katsotaan jäätyvän, kun lämpötila maassa alittaa 0 ^{0}C:n. Todellisuudessa jäätyminen alkaa vasta hieman alemmassa lämpötilassa ja esimerkiksi savessa voi olla huokosissa jäätymätöntä vettä vielä – 20 ^{0}C:n lämpötilassa. Jäätymisen nopeus riippuu lämpötilan lisäksi jäätyvän veden määrästä.

Maakerroksen routiminen riippuu myös maan jännitystilasta, maalajin huokoskokojakautumasta, huokosveden laadusta, mineraalikoostumuksesta ja veden liikkeistä maassa.

4.1.2 Maan routivuus

Suomessa rakennettujen homogeenisten maapatojen yleisin tiivisteosan materiaali on hiekkamoreeni tai silttinen hiekkamoreeni. Vyöhykepatojen tiivistesydän on rakennettu usein savesta, mutta myös moreenia on käytetty.Molemmat maalajit ovat yleensä enemmän tai vähemmän routivia.

Suomessa on selvitetty eri routivuuskriteerien soveltuvuutta maamme olosuhteisiin erillisessä tutkimusprojektissa (Friberg ja Slunga 1989), jonka tuloksia on pyritty hyödyntämään myös ISSMFE:n (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering) routakomitean työssä.

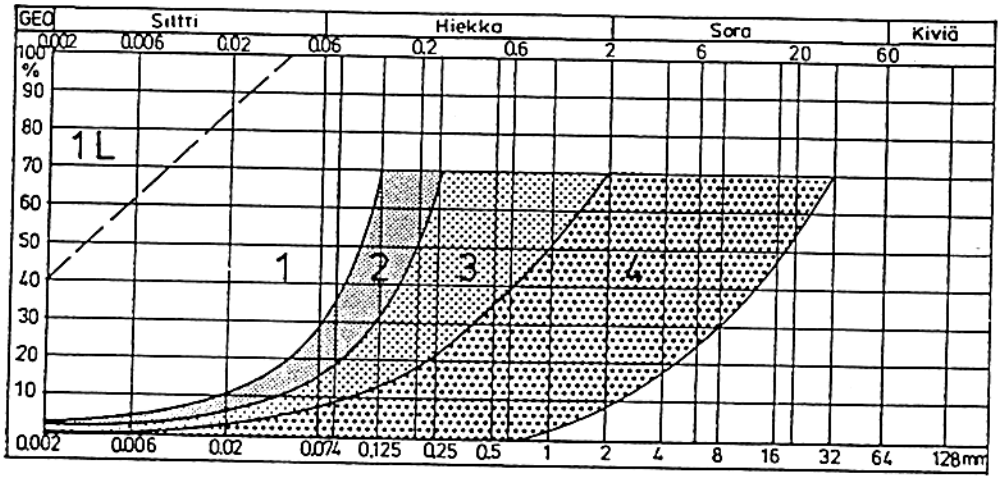
Rakeisuuden perusteella voidaan määrittää yleensä vain se onko maa routivaa vai routimatonta, mutta ei routivuuden voimakkuutta. ISSMFE:n routakomitean (TC–8 1989) suosittelema routivuuskriteeri rakeisuuteen perustuvalle maalajin routivuuden arvioinnille on esitetty kuvassa 2.

Kaikkien tämän tutkimuksen kohteena olevien patojen tiivisteosan rakennusmateriaali on rakeisuuden perusteella routivaa.

Rakeisuuteen perustuvaa routivuuden arviointia täydentäviksi menetelmiksi, routivan ja routimattoman karkearakeisen ja moreenimaa–aineksen raja–alueilla, soveltuvat kapillaarinen nousukorkeus ja hienoustekijä sekä savi– ja silttimaalajien puoleisella raja–alueella plastisuuslukuun ja juoksevuusindeksiin perustuvat kriteerit (ISSMFE TC–8 1989).

Huolellisesti suoritetut routanousukokeet mahdollistavat edellä mainittujen routivuus-kriteerien kalibroimisen ja routimisen voimakkuuden arvioimisen. Routanousukoe voidaan tehdä vakiolämpötilakokeena, jossa käytetään yhtä tai useampaa portaittaista jäädytyspuolen lämpötilan muutosta ja mitataan vastaava routanousu, kun on saavutettu lämpötilatasapaino. Tämän vakiolämpötilakokeen tuloksista saadaan segregaatiopotentiaali, jonka perusteella voidaan suorittaa maalajien routivuusluokitus. Toisessa koetyypissä käytetään jatkuvasti alenevaa jäädytyspuolen lämpötilaa, jolloin saavutetaan routarintaman etenemisnopeudelle vakioarvo. Vakioroutaantumiskokeessa kuten CRREL-kokeessa pyritään säilyttämään routarintaman etenemisnopeus vakiona (0,6 – 1,3 cm/vrk) ja mitataan tästä aiheutunut routanousunopeus (taulukko 1).

Maalajin routivuuden arvioimiseen ominaispinta-alan tai huokoskokojakautuman perusteella ei vielä ole olemassa luotettavaa kriteeriä.



Kuva 2. Maalajin routivuuden määrittäminen rakeisuuskäyrän perusteella (ISSMFE TC-8 1989).
1) Kaikki maalajit, joiden rakeisuuskäyrät ovat alueella 1, ovat routivia.
2) Ne maalajit, joiden rakeisuuskäyrät sijaitsevat alueella 2, 3 tai 4, ovat routimattomia elleivät käyrien alapäät pääty pysyvästi seuraavalle rakeisuudeltaan hienommalle alueelle.
3) Ne maalajit, joiden rakeisuuskäyrät sijaitsevat alueella 1L, ovat lievästi routivia.
4) Rajatapauksissa routivuus on tarkistettava tarkemmin menetelmin.

ISSMFE:n routakomitean esittämä routivuusluokitus on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Maalajien routivuusluokitus eri määritysmenetelmillä (Friberg & Slunga 1989, ISSMFE TC-8 1989).

Routivuusluokka	Plastisuuskartta		*) Kapillaarinen nousukorkeus h_k m	Juoksevuus indeksi I_L,	*) Hienous tekijä R % 0,074 mm ollessa 20 %	Segregaatio potentiaali SP_m	Routanousu-nopeus, mm/d
	Maalaji USCS-luokitus	Plastisuusluku, I_p Juoksuraja, w_L, %					
Routimaton	GW, GP SW, SP	$I_p < 1$	< 1	≤ 0	< 2,5	< 0,5	< 0,5
Lievästi routiva	CH	$I_p \geq 7$; $w_L > 50$	1,0 – 1,5	0 – 0,25	2,5 – 5	0,5 – 1,5	0,5 – 2
Keskinkertaisesti routiva	CL A-linjan yläp. OH, MH A-linjan alap.	$I_p \geq 7$; $w_L = 35–50$ $I_p \geq 7$; $w_L > 50$	1,5 – 2,0	0,25 – 0,5	5 – 10	1,5 – 3,0	2 – 4
Erittäin routiva	CL A-linjan yläp. ML A-linjan alap. OL A-linjan alap.	$I_p \geq 7$; $w_L < 35$ $I_p \leq 4$; $w_L < 50$ $I_p \geq 7$; $w_L = 35–50$	> 2,0	>0,5	> 10	> 3,0	> 4

A-linjan yläpuoliset maalajit, joiden plastisuusindeksi I_p on välillä 4 – 7, ovat rajatapauksia ja vaativat lisätutkimuksia

*) Suurilla kapillaarisen nousukorkeuden (> 10 m) ja hienoustekijän (> 30) arvoilla maan routivuus lievenee pienen vedenläpäisevyyden vuoksi

4.1.3 Routanousu

Routanousu syntyy, kun jäätymisen yhteydessä maan huokostilaan virtaa vettä, joka jäätyessään muodostaa erillisiä kerroksia ja linssejä tai muutoin paisuessaan aiheuttaa maan tilavuuden kasvua ja maanpinnan nousua.

Routanousu aiheuttaa eri rakenteille huomattavia vahinkoja rakenteiden rikkoutumisena kuten talojen perustusten halkeilu, teiden routavauriot ja maapatojen tiivistesydämen löyhtymisestä johtuva vedenläpäisevyyden kasvu ylävesipinnan tasolla tai sen alapuolella.

4.1.4 Sulamispehmeneminen

Roudan sulaminen alkaa ulkoilman lämpenemisen johdosta pääasiassa maan pinnalta käsin. Vähäistä sulamista tapahtuu myös routarajalla.

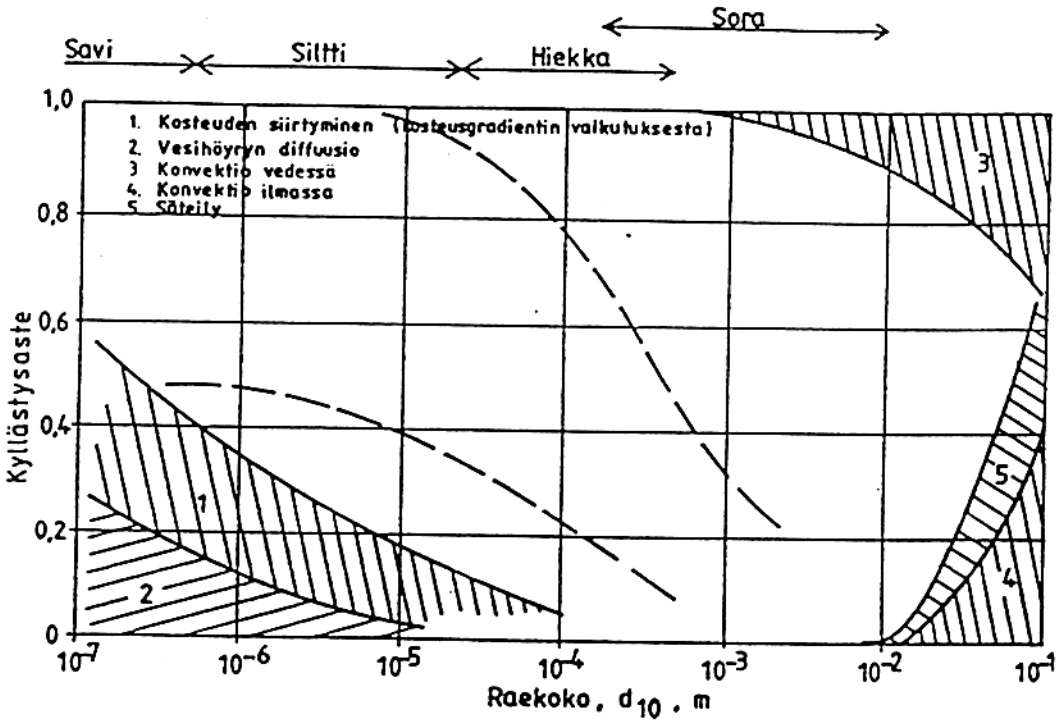
Routimisen yhteydessä maahan sitoutuu jäätä, joka sulaessaan vapautuu huokosvedeksi. Osittain kyllästetyssä maassa ei tapahdu muuta kuin vesipitoisuuden kasvua kuivaan aikaan verrattuna. Jään kyllästämässä maassa voi vapautuva vesimäärä olla suurempi kuin sulan maan huokostila, jolloin ylimääräinen vesi kantaa osan maan painosta ja maalle mahdollisesti tulevan lisäkuormituksen. Roudan sulaessa pinnalta vapautuva vesi ei pääse poistumaan alaspäin vielä sulamattoman ja vettä läpäisemättömän routakerroksen läpi. Tällöin sulanut maakerros muuttuu ylikosteaksi ja pehmenee.

4.2 Maan lämpötekniset ominaisuudet

4.2.1 Lämmön siirtyminen maassa

Roudan tunkeutumissyvyyteen maassa vaikuttaa pakkasmäärän ja lumipeitteen lisäksi merkittävästi itse maan lämmönsiirtokyky. Merkittävin lämmön siirtymismekanismi maassa on johtuminen, joka tapahtuu rakeiden ja niitä ympäröivän veden ja ilman kautta. Muita vähemmän merkittäviä lämmönsiirtymismekanismeja maassa ovat säteily huokosten kautta ja konvektio veden, vesihöyryn tai ilman välittämänä.

Lämmön siirtyminen maassa muulla tavoin kuin johtumalla edellyttää tiettyä raekokoa ja kyllästysastetta (kuva 3).



Kuva 3. Erilaisten lämmön siirtymismekanismien edellytyksenä oleva kyllästysaste raekoon suhteen. Todennäköinen kyllästysaste–raekokoalue luonnon olosuhteissa on merkitty katkoviivoin (Johansen 1976).

Lämmön siirtymistä johtumalla kuvaavia maan lämpöteknisiä ominaisuuksia ovat lämmönjohtavuus, ominaislämpö, tilavuuslämpökapasiteetti ja tilavuusyksikköä kohti vapautuva tai sitoutuva olomuodonmuutoslämpö.

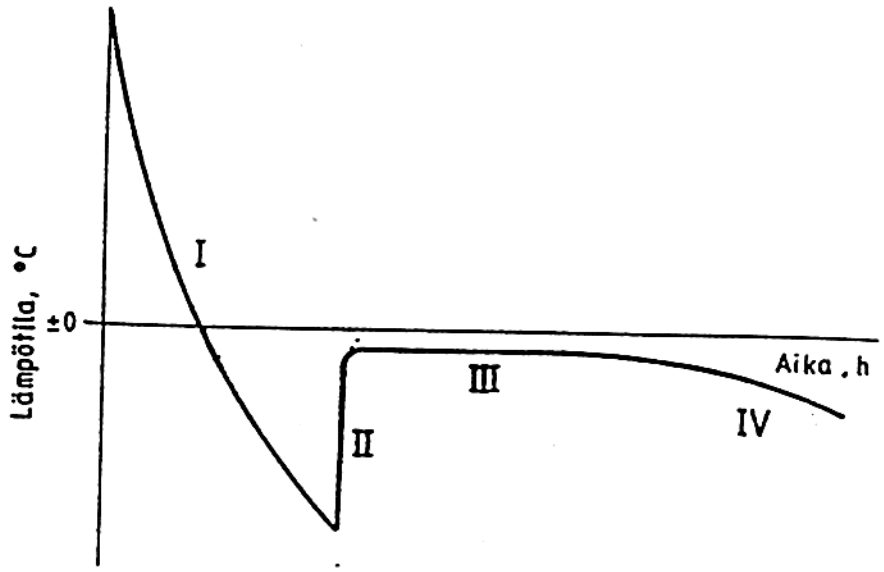
Maan lämpöteknisiä ominaisuuksia tietyssä lämpötilassa voidaan arvioida maan tiheyden, raekoon, mineraalikoostumuksen ja vesipitoisuuden perusteella. Lämpöteknisten ominaisuuksien lämpötilariippuvuuteen vaikuttaa pääasiassa huokosissa oleva vesi. Maan lämmönjohtavuus ja tilavuuslämpökapasiteetti voidaan käytännön tarkasteluissa olettaa vakioiksi, kun huokosvesi on likimäärin kokonaan sula tai jäätynyt. Olomuodonmuutoslämmön määrä tilavuusyksikköä kohden on suoraan verrannollinen jäätyneen tai sulaneen veden määrään.

Huokosvesi voi esiintyä nesteenä, vesihöyrynä tai jäänä. Nestemuodossa oleva vesi voi olla vapaata, kapillaarista tai eri lailla maahiukkasiin sitoutunutta. Huokosveden lämpötekninen käyttäytyminen määräytyy sen mukaisesti, miten vesi on sitoutunut. Maahiukkasiin sitoutunut vesi jäätyy yleensä alle 0 °C lämpötilassa ja osa siitä voi pysyä kokonaan jäätymättömänä. Käytännössä kaiken maassa olevan veden katsotaan jäätyneen vasta alle – 20 °C:n lämpötilassa (Jumikis 1962, 1977).

Maassa oleva vapaa vesi, joka esiintyy vajovetenä tai pohjavetenä ja liikkuu gravitaatiovoiman tai hydrostaattisen paine-eron vaikutuksesta, jäätyy 0 °C:n lämpötilassa (Jumikis 1962).

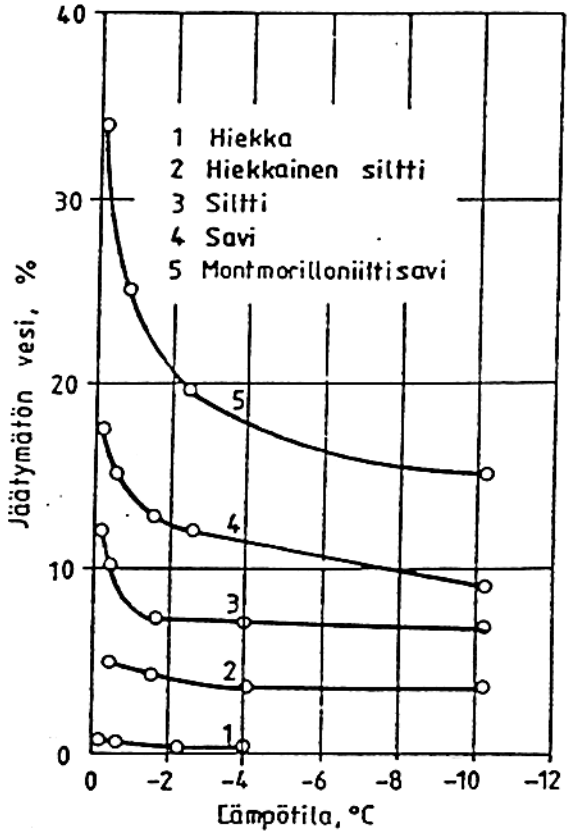
Kapillaarinen vesi nousee pohjaveden pinnan tason yläpuolelle veden pintajännityksen vaikutuksesta ja kapillaarisen nousun korkeus riippuu maan rakeisuudesta. Kapillaarinen vesi jäätyy noin –1 °C:n lämpötilassa (Jumikis 1962).

Maa käyttäytyy jäähtyessään ja jäätyessään periaatteellisesti kuvan 4 mukaisesti. Vaiheessa I maa jäähtyy, ja tämän vaiheen lopussa maa hetkellisesti alijäähtyy, jolloin lämpötila laskee alle huokosveden jäätymispisteen ilman, että jäätymistä tapahtuu. Vaiheessa II lämpötila kohoaa nopeasti huokosveden jäätymispisteeseen heti, kun jäätä alkaa muodostua. Tämän jälkeen lämpötila pysyy vakiona (vaihe III), kunnes kaikki vapaa vesi on jäätynyt. Vaiheessa IV lämpötila alkaa laskea. Lämpötilan laskua hidastaa mahdollinen maahiukkasiin sitoutuneen veden jäätyminen (Tsytovich 1975).



Kuva 4. Maan käyttäytyminen jäädytettäessä (Tsytovich 1975).

Hienorakeisten maalajien jäätyessä huomattava osa huokosvedestä voi pysyä jäätymättömänä luonnon olosuhteissa. Kuvassa 5 on esitetty eri maalajien jäätymättömän veden määrä.



Kuva 5. Jäätymättömän veden määrä jäätyneessä maassa lämpötilan suhteen eri maalajeissa (Tsytovich 1975).

4.2.2 Lämmönjohtavuus

4.2.21 Yleistä

Maan lämmönjohtavuuteen vaikuttavat maan rae– ja mineraalikoostumus, maan lämpötila, tiheys ja vesipitoisuus.

Lämmönjohtavuus pienenee, kun materiaalin huokoisuus kasvaa. Lisäksi lämmönjohtavuudessa tapahtuu jyrkkä lasku, kun kyllästysaste laskee alle 50 %.

Maan lämmönjohtavuus λ (W/mK) määritellään lämpömääränä, joka aikayksikössä läpäisee maan yksikköpoikkipinta–alan lämpötilagradientin ollessa yksi.

Maa–aineksen lämmönjohtavuus riippuu mineraalikoostumuksesta ja orgaanisen aineen määrästä. Mineraaliaineksista merkittävin on kvartsipitoisuus, koska kvartsin lämmönjohtavuus on selvästi muiden mineraaliainesten lämmönjohtavuutta suurempi (taulukko 2).

Taulukko 2. Maan ainesosien lämmönjohtavuuden arvoja (Farouki 1986, Sundberg 1988).

Maan ainesosa	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)
Mineraaliaines	
– kvartsi	7,7...8,4
– muu mineraaliaines keskimäärin	2,9
Vesi	0,57
Jää	2,1
Ilma	0,026

Koska veden lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi kuin ilman, vesipitoisuudella on suuri vaikutus maan lämmönjohtavuuteen. Lämpötilan merkitys on suurimmillaan, kun maassa tapahtuu veden sulamista tai jäätymistä.

Orgaanisen aineen lämmönjohtavuus on noin 0,3 W/mK.

Lämmönjohtavuus voidaan määrittää joko maastossa thermal probe–mittauksilla tai laboratoriossa maanäytteestä. In–situ mittaukset suoritetaan luonnollisissa ja häiriintymättömissä olosuhteissa, mutta ongelmia aiheuttaa se, kuinka hyvin mittausajankohdan vesipitoisuus vastaa esimerkiksi vesipitoisuuden vaihtelua maastossa.

Maastomittaus on suositeltavampi, mikäli mittaus voidaan suorittaa riittävän usein ajankohdasta riippuvien muuttujien määrittämiseksi. Laboratoriomittausta puoltaa pieni näytekoko ja tulosten luotettavuus, jos on täytetty seuraavat ehdot (Sundberg 1988):
- näyte on häiriintymätön,
- näyte on edustava ja riittävän suuri mittausten kannalta,
- lämpötilaero maaston ja laboratorion välillä on huomioitu ja
- ajasta riippuvien muuttujien (mm. vesipitoisuus) vaikutus on huomioitu.

Kohdassa 8.3 on selvitetty Kyrkösjärven moreenille tehtyjä lämpöteknisten ominaisuuksien määrityksiä.

4.2.22 Veden, jään ja lumen lämmönjohtavuus

Veden ja jään lämpöteknisiä ominaisuuksia on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Veden ja jään lämpötekniset ominaisuudet (Sundberg 1988).

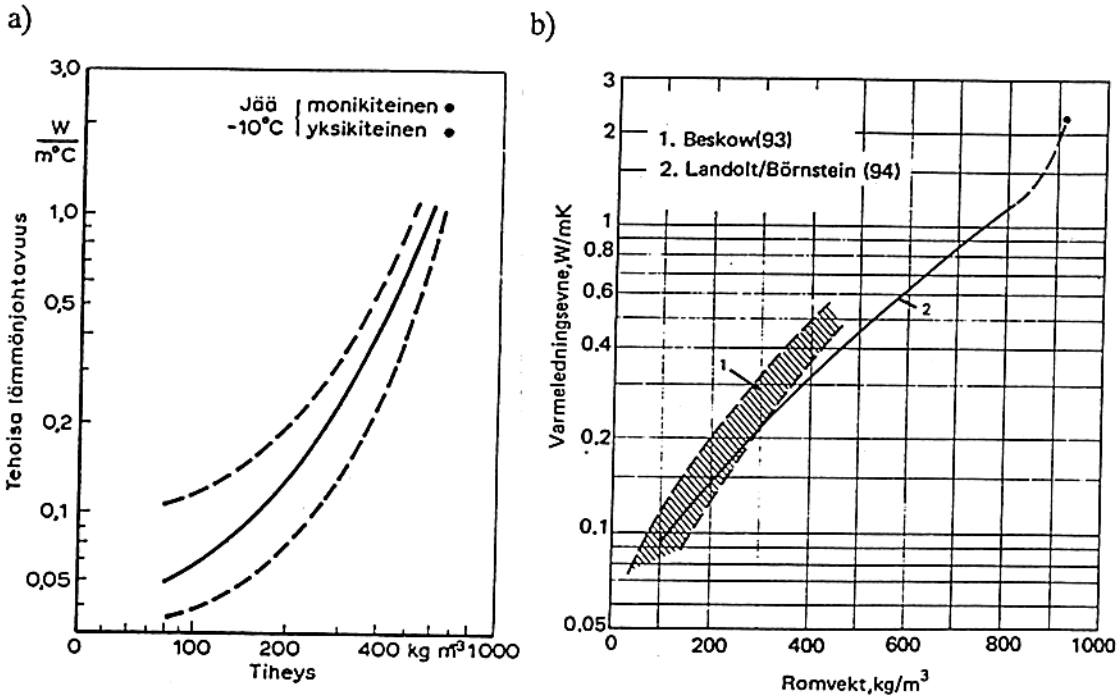
λ_w	λ_{ice}	C_w	C_{ice}	L	ρ_w	ρ_{ice}
W/mK	W/mK	MJ/m^3K	MJ/m^3K	MJ/m^3	kg/m^3	kg/m^3
0,57	2,1	4,16	2,2	333,5	1000	917

Lumen lämmönjohtavuus vaihtelee suuresti tiheyden, kiderakenteen ja lämpötilan funktiona, joista tiheys on määräävin. Taulukossa 4 on esitetty lumen tiheys Beskow'in mukaan eri olosuhteissa.

Taulukko 4. Lumen tiheys eri olosuhteissa (Frost i Jord Nr. 17 1976)

Lumen laatu	Tiheys ρ , kg/m^3
Uusi lumi	~ 100
Vanha lumi	~ 200
Sulanut ja uudelleen jäätynyt lumi	200...300

Seuraavissa kuvissa 6a (Kuusisto 1986, Langham 1981) ja 6b (Frost i jord Nr. 17 1976) on esitetty lumen lämmönjohtavuus tiheyden funktiona eri lähteiden mukaan.



Kuva 6a ja 6b. Lumen tehoisa lämmönjohtavuus tiheyden funktiona (Langham 1981, Kuusisto 1986, Frost i Jord Nr. 17 1976). Kuvissa on esitetty eri tutkijoiden saamien tulosten vaihteluväli sekä riippuvuuden keskimääräinen luku.

Eri tutkijoiden saamat arvot poikkeavat huomattavasti toisistaan. Lumen lämpötilan aletessa sen lämmönjohtavuus kasvaa noin 0,2 %/°C (Kuusisto 1986).

4.2.23 Maan lämmönjohtavuus Kerstenin menetelmällä

Kersten on määrittänyt kokeellisesti (1949) hienorakeisten ja karkearakeisten mineraalimaalajien lämmönjohtavuusarvoja sulassa ja jäätyneessä tilassa (kaavat 1 ja 2) kuivatilavuuspainon ja vesipitoisuuden perusteella (Johansen 1972, Farouki 1981, Saarelainen 1992).

Sulan maan (+4 ^{0}C)lämmönjohtavuus:

$$\lambda = (\alpha \log w + \beta)\ 10^{0,625\rho_d} \qquad (1)$$

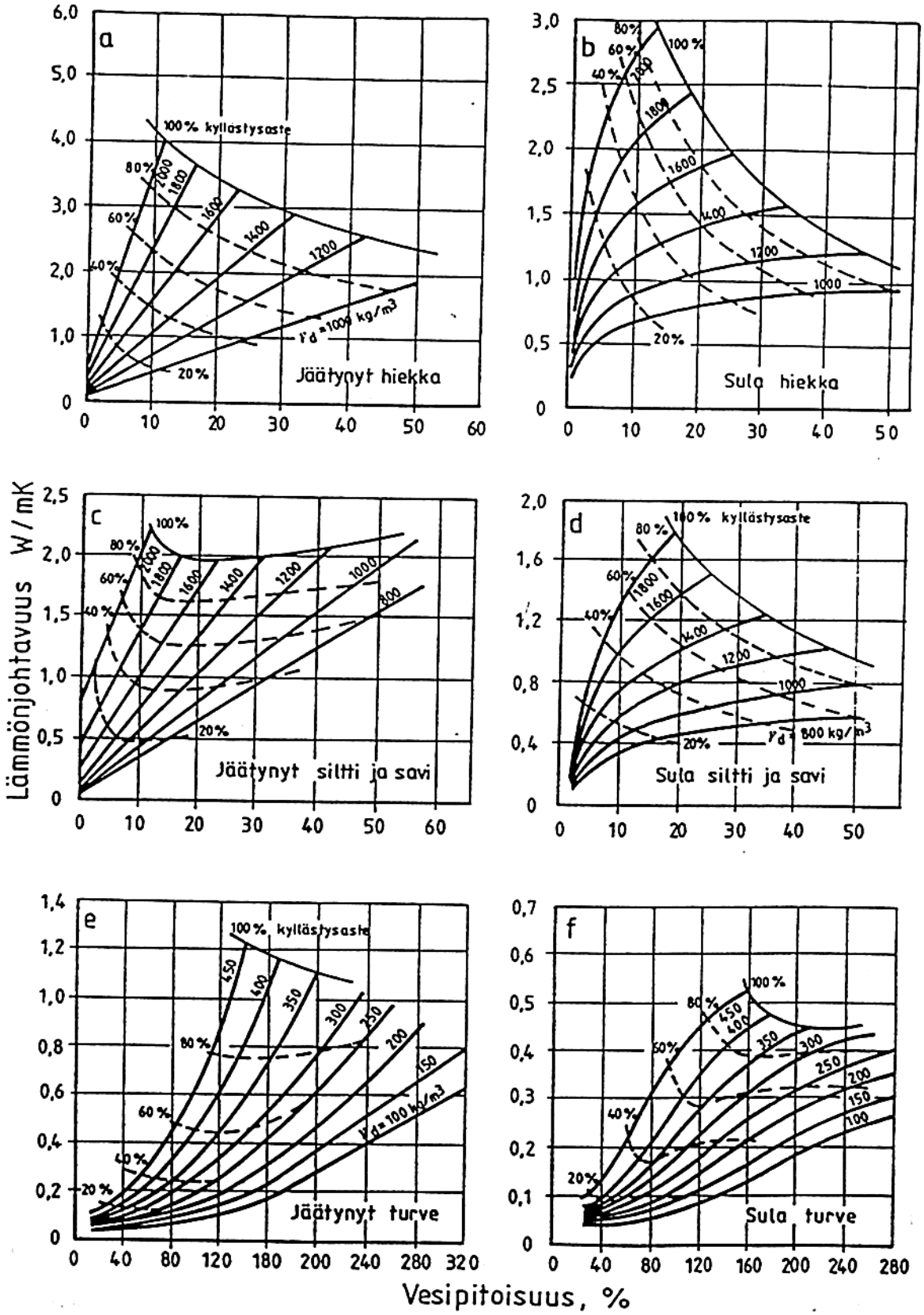
α, β	ovat	vakioita hienorakeinen maa (savi ja siltti): $\alpha = 0,13$ $\beta = -0,029$ karkearakeinen maa (hiekka): $\alpha = 0,10$ $\beta = 0,058$

Jäätyneen maan (−4 ^{0}C)lämmönjohtavuus:

$$\lambda = a\ 10^{b\rho_d} + c\ 10^{d\rho_d}\ w \qquad (2)$$

ρ_d	on	kuivairtotiheys, 10^3 kg/m^3
w		vesipitoisuus, %
a, b, c, d	ovat	vakioita hienorakeinen maa (savi ja siltti): a = 0,0014 b = 1,4 c = 0,012 d = 0,50 karkearakeinen maa (hiekka): a = 0,011 b = 0,81 c = 0,0046 d = 0,91.

Kuvassa 7 on esitetty lähinnä Kerstenin työn pohjalta määritetyt eri maalajien keskimääräiset lämmönjohtavuudet vesipitoisuuden ja kuivatilavuuspainon suhteen.



Kuva 7. Maan keskimääräinen lämmönjohtavuus jäätyneenä ja sulana (Helander 1985, Andersland & Anderson 1978).

a) Jäätynyt hiekka
b) Sula hiekka
c) Jäätynyt siltti ja savi
d) Sula siltti ja savi
e) Jäätynyt turve
f) Sula turve

4.2.24 Maan lämmönjohtavuus Johansenin menetelmällä

Johansen on kehittänyt edelleen mineraalimaalajien lämmönjohtavuuden määrittämistä (Johansen ja Frivik 1980) ottamalla huomioon kuivatilavuuspainon ja kyllästysasteen lisäksi kvartsipitoisuuden ja jäätymättömän veden määrän (kaavat 3 – 13).

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

jossa λ on lämmönjohtavuus, W/mK
λ^0 kuivan maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ^1 vedellä kyllästetyn maan lämmönjohtavuus, W/mK
Ke Kerstenin luku
S_r kyllästysaste.

$$\lambda^0 = \alpha\ n^{-\beta} \qquad (4)$$

jossa α on 0,034
β 2,1
n huokoisuus.

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \qquad (5)$$

jossa ρ_d on maan kuivatiheys, kg/m^3
ρ_s maan kiintotiheys, kg/m^3.

$$\lambda^1 = \lambda_w^n\ \lambda_s^{(1-n)} \qquad (6)$$

jossa λ_w on veden (jään) lämmönjohtavuus, W/mK
λ_s maa–aineksen lämmönjohtavuus, W/mK.

$$\lambda_s = \lambda_q^q\ \lambda_r^{(1-q)} \qquad (7)$$

jossa λ_q on kvartsin lämmönjohtavuus, W/mK
λ_r "jäännöksen" lämmönjohtavuus, 2 – 3 W/mK mineraalien mukaan
q kvartsipitoisuus.

Jäätynyt maa:

$$Ke = S_r \qquad (8)$$

Sula maa:

$$Ke = a \log S_r + 1 \qquad (9)$$

jossa a on 0,68 (karkearakeinen maa)
0,94 (hienorakeinen maa, savipitoisuus > 2 %).

$$S_r = \frac{w\,\rho_d}{n\,\rho_w} \qquad (10)$$

jossa w on vesipitoisuus
ρ_w veden tiheys.

Mikäli jäätyneessä maassa on jäätymätöntä vettä, lämmönjohtavuus voidaan määrittää kaavan (11) mukaan.

$$\lambda = \lambda_f + (\lambda_u - \lambda_f)\,\frac{w_u}{w_t} \qquad (11)$$

jossa λ_u on sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_f jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
w_u jäätymättömän veden osuus
w_t kokonaisvesipitoisuus.

Jäätymättömän veden määrää voidaan arvioida kaavan (12) tai (13) mukaan (Johansen & Frivik 1980).

$$w_u = \alpha\,\Theta^{\beta} \qquad (12)$$

jossa α, β ovat vakioita
Θ on lämpötila, °C

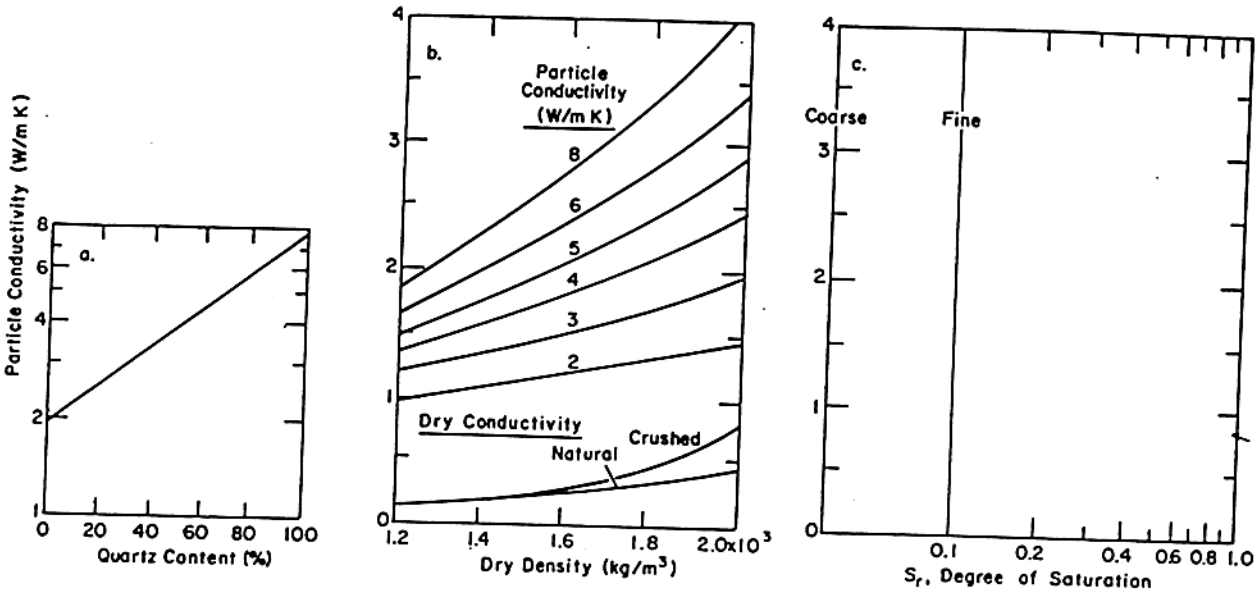
$$\ln w_u = 0{,}2618 + 0{,}5519 \ln S - 1{,}449\, S^{-0{,}264} \ln\Theta \qquad (13)$$

jossa S on maan ominaispinta–ala, m^2/g

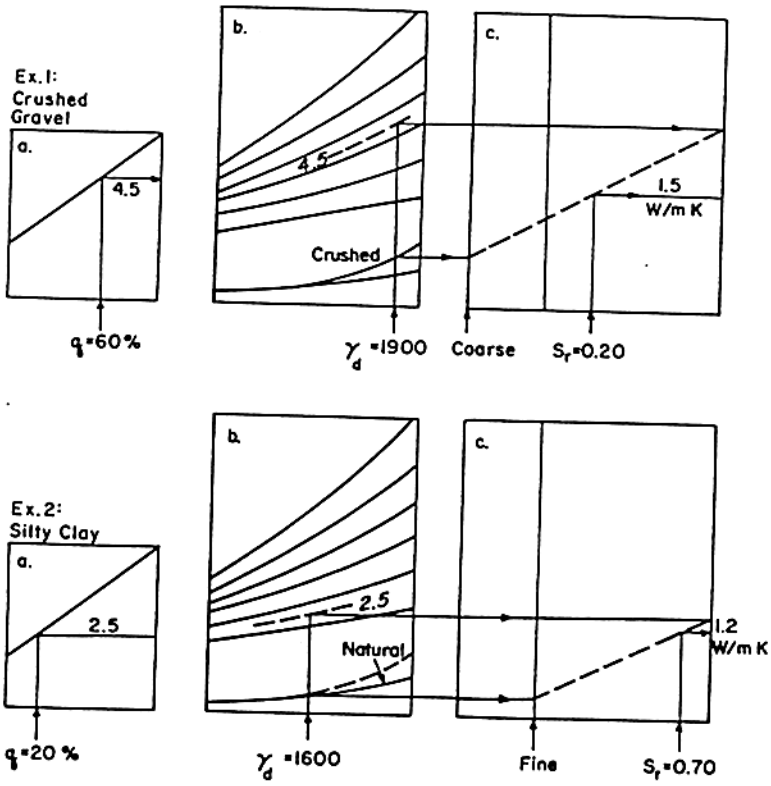
Kuvissa 8 ja 9 on esitetty kaavoihin (3 – 13) perustuvat käyrästöt ja esimerkit niiden käytöstä.

Partikkelin lämmönjohtavuus kvartsipitoisuuden mukaan määritetään kuvasta 8a.

Johansenin menetelmän hankaluutena on mineraalikoostumuksen määrittäminen käytännön tapauksissa etenkin karkearakeisilla maalajeilla, joilla kvartsipitoisuus vaihtelee huomattavasti.



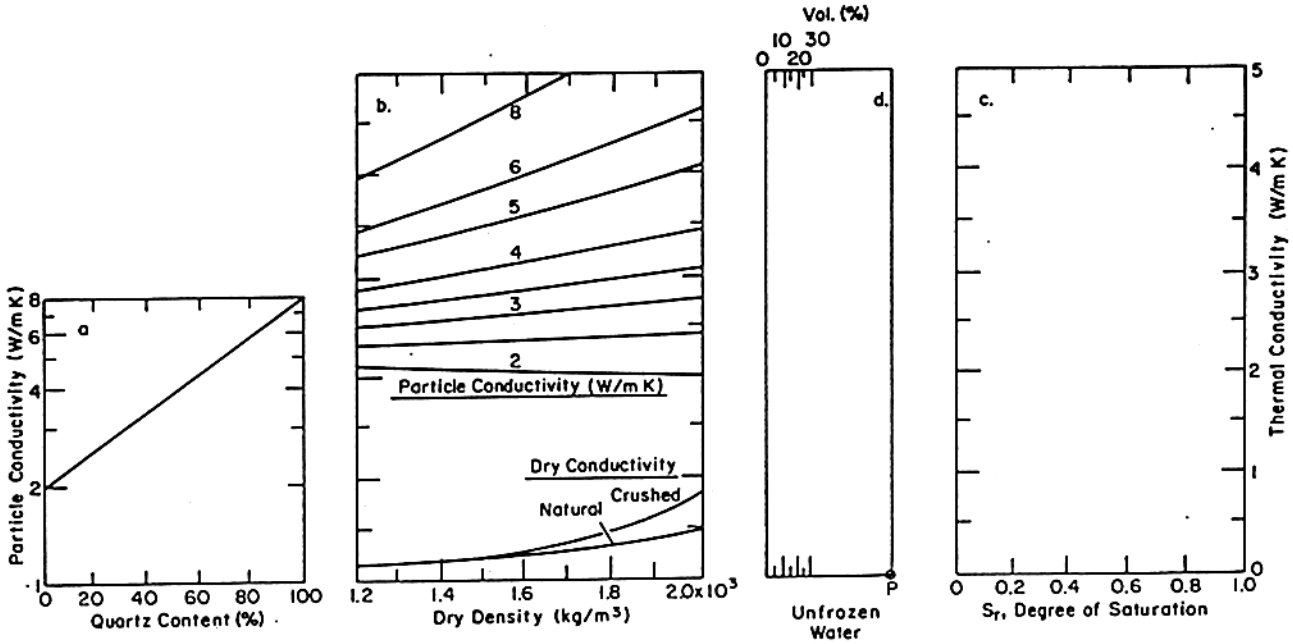
Input variables: 1. *Quartz content*
2. *Crushed or natural*
3. *Coarse or fine. A soil with more than 5% of material having grain size less than 2 μm is considered 'fine.'*
4. *Dry density*
5. *Degree of saturation*



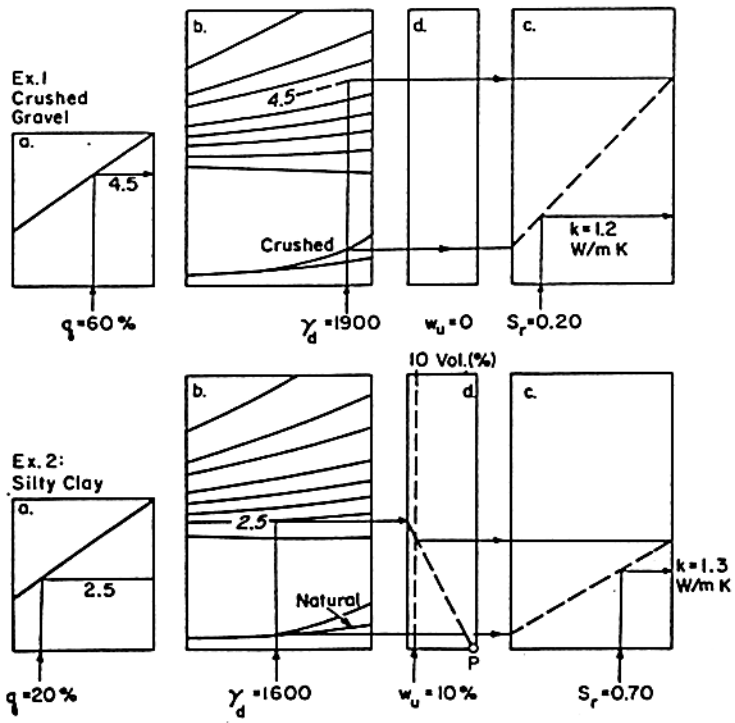
Instructions for use of the diagrams are explained by two examples: Example 1 for a coarse soil and Example 2 for a fine soil:

1. *In part* a, *the particle thermal conductivity is estimated from the quartz content.*
2. *This value is then used in part* b, *together with the given dry density, for determining the thermal conductivity in the saturated condition.*
3. *The conductivity of the dry materials at the same dry density is found from the curves marked* dry conductivity *in part* b *(discriminate between crushed and natural soils).*
4. *From these extremes, the thermal conductivity at the actual degree of saturation is found by interpolation in part* c *(discriminate between coarse and fine soils).*

Kuva 8. Sulan mineraalimaalajin lämmönjohtavuus (Farouki 1981 after Johansen 1975).



Input variables: 1. *Quartz content*
2. *Crushed or natural*
3. *Dry density*
4. *Unfrozen water content*
5. *Degree of saturation*



Instructions for use of the diagrams are explained by two examples: Example 1 for a coarse soil and Example 2 for a fine soil:

1. *In part* a *the particle thermal conductivity is estimated from the quartz content.*
2. *This value is then used in part* b, *together with the given dry density, for determining the thermal conductivity in the saturated condition.*
3. *The conductivity of the dry materials at the same dry density is found from the curves marked* dry conductivity *in part* b.
4. *If a certain percentage of the water is unfrozen, then the saturated thermal conductivity must be reduced in the manner shown by the graphical construction in part* d.
5. *The thermal conductivity at the actual degree of saturation is then found by linear interpolation as in part* c.

Kuva 9. Jäätyneen mineraalimaalajin lämmönjohtavuus (Farouki 1981 after Johansen 1975).

4.2.25 Maan lämmönjohtavuus Sundbergin menetelmällä

Sundberg (1988) määritti tutkimuksissaan Ruotsissa yli 4 000 kallionäytteen ja 900 maanäytteen lämmönjohtavuuden. Lämmönjohtavuuden lisäksi näytteistä oli määritetty vesipitoisuus, tiheys, humuspitoisuus, rakeisuus, kvartsipitoisuus ja vedenpidätyskyky (pF–arvo).

Suorittamiensa mittauksien perusteella Sundberg on laatinut Johansenin menetelmään perustuen mitoituskäyrät kallion ja eri maalajien lämmönjohtavuuden määrittämiseksi.

Taulukkoon 5 on koottu eri maalajien lämmönjohtavuuksia. Jäätyneen maan arvojen on oletettu kuvaavan täysin jäätynyttä maata, jossa ei ole yhtään jäätymätöntä vettä.

Taulukko 5. Eri maalajien lämpöteknisten parametrien arvoja. Suluissa esitetyt arvot ovat yleisempiä (Sundberg 1988).

Soil	Thermal conductivity W/mK		Thermal capacity J/m^3K		Latent heat,J/m^3
	Unfrozen	Frozen	Unfrozen	Frozen	
			x 10^6		x 10^8
Clay with high clay content	0.85–1.1	2.0–2.2	3.0–3.6	2.0	2.1–2.5
Dry crust clay ditto	1.1–1.4	1.7–2.3	2.6–3.0	1.7–2.0	1.1–1.6
Silty clay/ silt layer	1.1–1.5	2.3–2.8	2.9–3.3	2.0	1.5–2.0
Dry crust clay ditto	1.2–1.6	1.9–2.9	2.5–3.0	1.7–2.0	1.1–1.6
Silt	1.2–2.4	2.3–3.2	2.4–3.3	2.0	0.8–2.0
Sand, gravel below gw–table	1.5–2.6 (1.6–2.0)	2.7–3.3 (2.8–3.0)	2.5–3.2 (2.9)	2.0 (2.0)	0.8–1.7 (1.3–1.6)
Sand, gravel above gw–table	0.4–1.1 (0.7–0.9)	0.4–1.0 (0.8–0.9)	1.2–1.7 (1.4)	1.1–1.6 (1.2)	0.1–0.3 (0.2)
Till below gw–table	1.5–2.5	2.3–2.7	2.2–3.0	2.0	0.3–1.5
Sandy till above gw–table	0.6–1.8	0.5–1.6	1.3–1.9	1.2–1.5	0.1–0.8
Peat below gw–table	0.6	1.7	4.0	2.0	3.1–3.2
Peat above gw–table	0.2–0.5	0.4–1.5	0.7–3.2	0.5–1.7	0.6–2.4

Mitoituskäyrät on laadittu savelle, siltille ja hiekalle, moreenille sekä humusmaille lämmönjohtavuuden määrittämiseksi sulana ja jäätyneenä.

Lisäksi on esitetty käyrät tilavuuslämpökapasiteetin ja jäätymislämmön määrittämiseksi. Mitoituskäyrät on esitetty liitteessä 9.

Mitoituskäyrien (liite 9) käytön helpottamiseksi on esitetty taulukot 6 ja 7 , joista voi arvioida kuivatilavuuspainon ja kyllästysasteen vaihtelun sekä huokoisuuden ja tilavuuspainon eri maalajeilla. Näitä voi käyttää mikäli ei ole tehty tarkempia määrityksiä.

Taulukko 6. Kuivatiheyden ja kyllästysasteen vaihtelu eri maalajeilla. Suluissa esitetyt hiekan arvot esiintyvät suhteellisen usein (Sundberg 1988).

Jordart	Torrdensitet kg/m^3	Vattenmättnadsgrad %
Lera, homogen, hög lerhalt	700 – 1100	90 – 100
Torrskorpelera, homogen, hög lerhalt	1200 – 1400	70 – 90
Lera, inhomogen, siltskikt	1100 – 1400	90 – 100
Torrskorpelera, inhomogen, siltskikt	1200 – 1500	70 – 90
Silt	1100 – 1900	80 – 100
Sand, grus under grundvattenytan	1300 – 2000 (1500 – 1600)	100
Sand, grus ovan grundvattenytan	1300 – 2000 (1500 – 1600)	ca 20
Moränlera	1400 – 2000	70 – 100
Morän, normal	1500 – 2200	50 – 100
Morän, mycket lite finmaterial, ovan grundvattenytan	1500 – 2200	20 – 40
Torv, höghumifierad	50 – 250	70 – 100
Torv, låghumifierad, ovan grundvattenytan	50 – 250	20 – 60

Taulukko 7. Kuivatiheyden ja huokoisuuden välinen riippuvuus, kun kiintotiheydeksi on oletettu ρ_s = 2700 kg/m^3 ja huokosuus määritetään kaavalla $n = 1-\rho_d/\rho_s$ (Sundberg 1988).

Torrdensitet, kg/m^3	Porositetsandel
600	0.778
800	0.704
1000	0.630
1200	0.556
1400	0.481
1600	0.402
1800	0.333
2000	0.259
2200	0.185

4.2.26 Maan lämmönjohtavuus venäläisen ikiroutanormin perusteella

Taulukossa 8 on venäläisen ikiroutanormin mukaisia eri maalajien lämpöteknisiä ominaisuuksia sulassa ja jäätyneessä tilassa (SNiP II-18-76 RIL 1985).

Taulukko 8. Maan lämpöteknisiä ominaisuuksia (SNiP II-18-76 RIL 1985).

Maan kuivatiheys 10^3 kg/m^3	Maan suhteellinen vesipitoisuus	Maan lämmönjohtavuus, kcal/hmK [1]								Maan tilavuuslämpökapasiteetti kcal/m^3 K [2]	
		Hiekka		Hieno hiekka		Siltti ja savi		Turve			
		Sula	Jäätynyt	Sula	Jäätynyt	Sula	Jäätynyt	Sula	Jäätynyt	Sula	Jäätynyt
0,1	9,0	-	-	-	-	-	-	0,7	1,15	950	550
0,1	6,0	-	-	-	-	-	-	0,35	0,60	650	400
0,1	4,0	-	-	-	-	-	-	0,20	0,35	450	300
0,1	2,0	-	-	-	-	-	-	0,10	0,20	250	200
0,2	4,0	-	-	-	-	-	-	0,70	1,15	900	570
0,2	2,0	-	-	-	-	-	-	0,20	0,45	500	350
0,3	3,0	-	-	-	-	-	-	0,80	1,20	990	570
0,3	2,0	-	-	-	-	-	-	0,35	0,60	750	500
0,4	2,0	-	-	-	1,80	-	1,80	0,80	1,20	900	650
0,7	1,0	-	-	-	1,80	-	1,75	-	-	855	500
1,0	0,6	-	-	-	1,75	-	1,65	-	-	820	520
1,2	0,4	-	-	-	1,65	1,35	1,55	-	-	740	505
1,4	0,35	-	-	1,55	1,60	1,35	1,45	-	-	800	560
1,4	0,30	-	-	1,50	1,55	1,25	1,35	-	-	720	520
1,4	0,25	1,65	1,85	1,35	1,45	1,15	1,30	-	-	660	490
1,4	0,20	1,35	1,60	1,15	1,30	0,95	1,05	-	-	590	450
1,4	0,15	1,20	1,40	0,95	1,10	0,75	0,85	-	-	520	420
1,4	0,10	0,95	1,10	0,80	0,90	0,60	0,65	-	-	450	415
1,4	0,05	0,65	0,70	0,55	0,60	0,40	0,45	-	-	380	350
1,6	0,30	-	-	1,60	1,70	1,45	1,55	-	-	835	590
1,6	0,25	2,15	2,35	1,55	1,65	1,30	1,45	-	-	750	560
1,6	0,20	1,85	2,05	1,40	1,50	1,15	1,30	-	-	670	510
1,6	0,15	1,55	1,75	1,25	1,35	0,95	1,05	-	-	590	480
1,6	0,10	1,25	1,40	1,00	1,10	0,75	0,80	-	-	515	430
1,6	0,05	0,90	0,95	0,70	0,75	0,50	0,55	-	-	435	400
1,8	0,20	2,30	2,45	1,60	1,70	1,35	1,65	-	-	755	575
1,8	0,15	1,95	2,25	1,45	1,55	1,20	1,35	-	-	660	540
1,8	0,10	1,70	1,90	1,25	1,35	0,90	1,05	-	-	575	485
1,8	0,05	1,25	1,30	0,85	0,85	0,60	0,65	-	-	485	450
2,0	0,10	2,35	2,50	1,50	1,60	1,10	1,20	-	-	640	540
2,0	0,05	1,80	1,85	-	-	-	-	-	-	540	500

1) 1 kcal/hmK = 1,163 W/mK
2) 1 kcal/m^{3}K = 4,187 kJ/m^{3}K

4.2.3 Ominaislämpö

Ominaislämmöllä tarkoitetaan sitä lämpömäärää, joka tarvitaan muuttamaan aineen lämpötilaa yksikön verran massayksikköä kohden. Täten

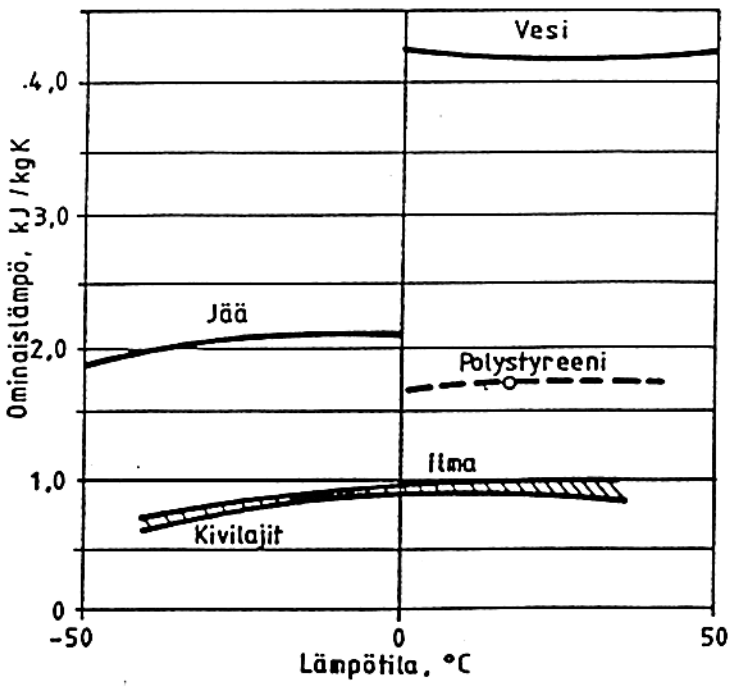
$$c = \frac{Q}{m\,\Delta T} \qquad (14)$$

c on ominaislämpö, kJ/kgK
Q lämpömäärä, kJ
m massa, kg
ΔT lämpötilan muutos, K

Eri aineiden ominaislämmön arvoja on esitetty taulukossa 9 ja kuvassa 10.

Taulukko 9. Maan ainesosien ominaislämmön arvoja (Farouki 1986, Sundberg 1986)

Maan ainesosa	Ominaislämpökapasiteetti (J/gK)
Mineraaliaines	
–kvartsi	0,73
–muu mineraaliaines keskimäärin	0,73
Vesi	4,19
Jää	2,03 (–10 °C)



Kuva 10. Eri aineiden ominaislämmön arvoja lämpötilan suhteen (Frost i Jord Nr. 17 1976).

Suomalaisen tutkimuksen mukaan maalajin ominaislämpö c_m vaihtelee rajoissa 0,84...0,94 J/gK, joista alaraja vastaa soraa ja yläraja savea (Aittomäki&Saviharju 1971). Koska veden ominaislämpökapasiteetin arvo (taulukko 9) on melko suuri, niin maan vesipitoisuudella on keskeinen vaikutus maan lämpökapasiteetin arvoon.

4.2.4 Maan tilavuuslämpökapasiteetti

Maan lämpökapasiteetilla tarkoitetaan sitä lämpömäärää, joka tarvitaan, kun massayksikön (tilavuusyksikön) lämpötila nousee 1 lämpöasteen verran. Ominaislämpökapasiteetti tarkoittaa ainesosan (veden, jään, mineraaliaineksen ja ilman) lämpökapasiteettia massayksikköä kohti laskettuna, kun taas tilavuuslämpökapasiteetissa on maan lämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti.

Lämpökapasiteetti kuvaa siis maan kykyä varastoida lämpöä. Lämpökapasiteetin, kuten myös lämmönjohtavuuden arvolla, on keskeinen merkitys maarakennetta koskevissa lämpöteknisissä laskelmissa. Epästationäärisessä eli ajasta riippuvassa lämpötilakentässä lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti yhdessä määräävät maan lämpökäyttäytymisen. Niiden suhteesta λ/C käytetään nimitystä lämmön diffusiviteetti eli lämpötilan johtavuus.

Maan lämpökapasiteetti voidaan laskea sen ainesosien massaosuuksien ja ominaislämpökapasiteettien avulla yhtälöstä 15.

$$C = \sum x_i c_i \qquad (15)$$

x_i on ainesosien i massaosuus
c_i ainesosan i ominaislämpökapasiteetti (J/gK)

Maassa, jossa ei tapahdu olomuodon muutoksia, voidaan ominaislämpökapasiteetteja pitää vakioina. Jättämällä ilman osuus huomiotta ja yhdistämällä mineraalien osuudet maalajin ominaislämpökapasiteetiksi c_m, saadaan yhtälö 16.

$$C = x_m c_m + x_v c_v + x_j c_j \qquad (16)$$

$x_{m,v,j}$ ovat maan, veden ja jään massaosuudet
$c_{m,v,j}$ maan, veden ja jään ominaislämpökapasiteetit

Tilavuuslämpökapasiteetti saadaan tiheyden ja ominaislämmön tulona, kaava 17.

$$C_v = c\,\rho \qquad (17)$$

C_v on tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^{3}K
c ominaislämpö, J/kgK
ρ tiheys, kg/m^3

Maan tilavuuslämpökapasiteetti voidaan määrittää laboratoriokokeilla tai arvioida empiirisillä kaavoilla sekä sulalle että jäätyneelle maalle.

Maan tilavuuslämpökapasiteetti lasketaan kaavojen (18) ja (19) mukaan (Andersland ja Anderson 1978).

$$C_{vu} = \frac{\rho_d}{\rho_w}\left(0{,}18 + 1{,}0\frac{w}{100}\right) C_{wv} \qquad (18)$$

$$C_{vf} = \frac{\rho_d}{\rho_w}\left(0{,}18 + 0{,}5\frac{w}{100}\right) C_{wv} \qquad (19)$$

jossa C_{vu} on sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
C_{vf} jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
C_{wv} veden tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
ρ_d maan kuivatiheys kg/m^3
ρ_w veden tiheys kg/m^3

4.2.5 Jäätymislämpö

Maassa oleva vesi alkaa jäätyä, kun lämpötila alittaa veden jäätymispisteen ja samalla vapautuu lämpöä faasimuutoksessa, jossa myös maan lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti muuttuvat. Tähän tapahtumaan kuuluu olennaisesti maan kolmas lämpötekninen ominaisuus, joka on vapautuva tai sitoutuva olomuodonmuutoslämpö eli faasimuutoslämpö. Tämä lämpömäärä lasketaan tilavuusyksikköä kohden kaavalla

$$L_s = (w_t - w_u)\rho_d l_w \qquad (20)$$

jossa L_s on maan jäätymislämpö, J/m^3
l_w veden jäätymislämpö, J/kg
w_t suhteellinen kokonaisvesipitoisuus
w_u jäätymättömän veden suhteellinen osuus
ρ_d kuivatiheys, kg/m^3

5 HAVAINNOT JA HAVAINTOMENETELMÄT

5.1 Ilman lämpötila ja pakkasmäärä

Havaintokausien pakkasmäärät voidaan käytännössä laskea säähavaintoasemien lämpötilatietojen perusteella. Pakkasmäärän laskemisessa käytetyt lämpötilatiedot ovat ilman lämpötiloja, joiden mittaus tapahtuu 2 metrin korkeudella maanpinnasta. Pakkasmäärä saadaan, kun vuorokauden keskilämpötilat pakkaskauden ajalta lasketaan yhteen. Pakkaskaudella tarkoitetaan aikaväliä, jolloin vuorokauden keskilämpötila laskee pysyvästi alle 0 ^{0}C:n ja taas keväällä pysyvästi nousee 0 ^{0}C:n yläpuolelle. Kun tältä ajalta piirretään keskilämpötilojen summakäyrä, saadaan talven pakkasmäärä-käyrä.

Pakkasmäärä määritettiin ko. patoa lähinnä olevan Ilmatieteenlaitoksen säähavainto-aseman vuorokauden keskilämpötilahavainnoista.

Tutkituista padoista on sivulla 50 taulukossa 10 esitetty padon nimi, sijaintikunta, padon valmistumisvuosi, vesi- ja ympäristöpiiri, patotyyppi (VP= vyöhykemaapato ja HP= homogeeninen maapato), padon korkeusasema, valittu säähavaintoasema ja sen korkeus merenpinnasta.

Tutkimuskohteiden havaintoihin sisältyvien talvikausien sääolosuhteita on käsitelty tarkemmin kohdassa 9.

Pakkasmäärä (h^{0}C) saadaan, kun vuorokauden keskilämpötilat pakkaskauden ajalta lasketaan yhteen ja kerrotaan vuorokauden tuntien määrällä.

$$F = 24 \sum |T_d| \ , \ [h^\circ C] \qquad (21)$$

Likimäärin voidaan pakkasmäärä laskea pakkaskauden lämpötilojen kuukausikeskiar-vojen ja keskimääräisen kuukauden tuntimäärän tulona kaavan (22) mukaan. Pakkasmäärä on tällöin noin 5 – 10% pienempi kuin kaavan (21) mukaan.

$$F = 730 \sum |T_m| , \ [h^\circ C] \qquad (22)$$

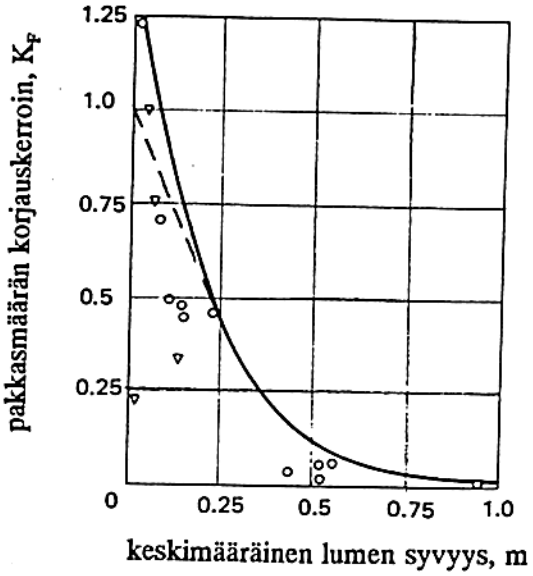
Pakkasmäärän yksikkönä voidaan käyttää joko (d^{0}C) tai (h^{0}C). Laskettaessa pakkas-määriä lämpötilojen kuukausikeskiarvojen perusteella, lyhyet väliaikaiset kylmäjaksot syksyllä ja keväällä eivät lisää pakkasmäärää.

Ilman pakkasmääriä voidaan korjata keskimääräisen lumipeitteen paksuuden avulla maanpinnan pakkasmääriksi (Frost i jord Nr. 17 1976). Maanpinnan pakkasmäärää voidaan likimäärin arvioida kaavan (23) avulla,

$$F_m = K_F \, F_i \qquad (23)$$

jossa	F_m	on	maanpinnan pakkasmäärä, h ^{0}C
	F_i		ilman pakkasmäärä, h ^{0}C
	K_F		kerroin

Kerroin K_F on määritetty kuvan 11 mukaan.



Kuva 11. Pakkasmäärän korjauskerroin (K_F) keskimääräisen lumen syvyyden funktiona (Frost i jord Nr. 17 1976, Helander & Slunga 1983).

Norjalaisessa tutkimuksessa (Frost i jord Nr. 17 1976) esitettyä kerrointa voidaan maapatojen yhteydessä soveltaa siten, että kerroin $K_F = 1$, kun maanpinta on lumeton. Lumettomalla alueella maanpinnan lämpötilojen perusteella laskettu pakkasmäärä on yleensä suurempi kuin ilman lämpötilojen mukaan. Maanpinnan lämpötilan arviointia kuitenkin vaikeuttavat ilman lämpötilojen vaihtelut sekä pakkaskauden eri aikoina maanpinnan ja ilman välillä tapahtuva lämpösäteily.

Normaalisti otaksutaan, että ei tehdä merkittävää virhettä, jos oletetaan, että maanpinnan pakkasmäärä on yhtä suuri kuin ilman pakkasmäärä lumettomissa olosuhteissa.

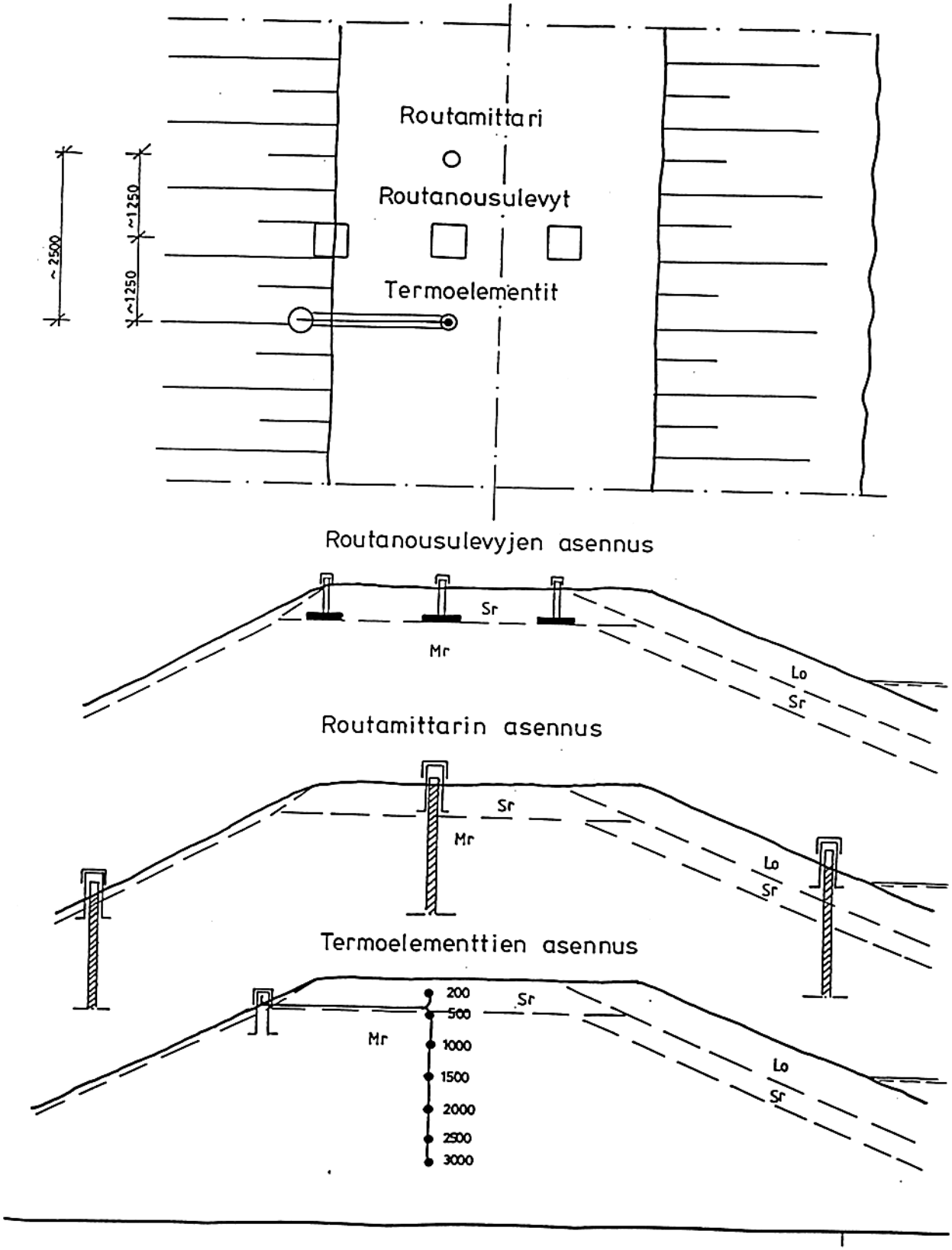
Liitteessä 7 on esitetty talven pakkasmäärä, pakkasmäärän toistuvuus, talven alkamis- ja loppumispäivät, talven pituus ja talven voimakkuus. Talven voimakkuutta on kuvattu luvulla, joka on saatu jakamalla talven pakkasmäärä (vrk^{0}C) talven pituudella (vrk).

5.2 Roudan syvyyden mittaus

Roudan syvyys mitattiin ns. Gandahlin putkella eli routamittarilla (Soveri & Johansson 1966). Routamittarin putkessa tislattuun veteen liuotettu metyleenisiniliuos (sekoitussuhde 1:2000 tislattuun veteen) muuttuu jäätyessään värittömäksi. Routakerroksen ylä- ja alaraja ilmenevät tällöin nesteen värin muutoskohtina (kuvat 12, 20, 21, 26 ja 29).

Patojen rakennekerrokset routamittareiden kohdalla, roudan maksimisyvyydet ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksessa havaintotalvina on esitetty liitteissä 1 – 3.

Routamittarin metyleenisiniliuos on vaihdettu vuosittain, ja näin värimuutos on ollut selvä ja routaraja hyvin havaittavissa. Roudan syvyys voitiin joko lukea suoraan



Kuva 12. Periaatekuva routahavaintomittareiden sijainnista patopoikkileikkauksessa.

mittaputkessa olevalta asteikolta tai mittaamalla mittanauhalla. Roudan syvyys ilmoitettiin syvyytenä maanpinnasta.

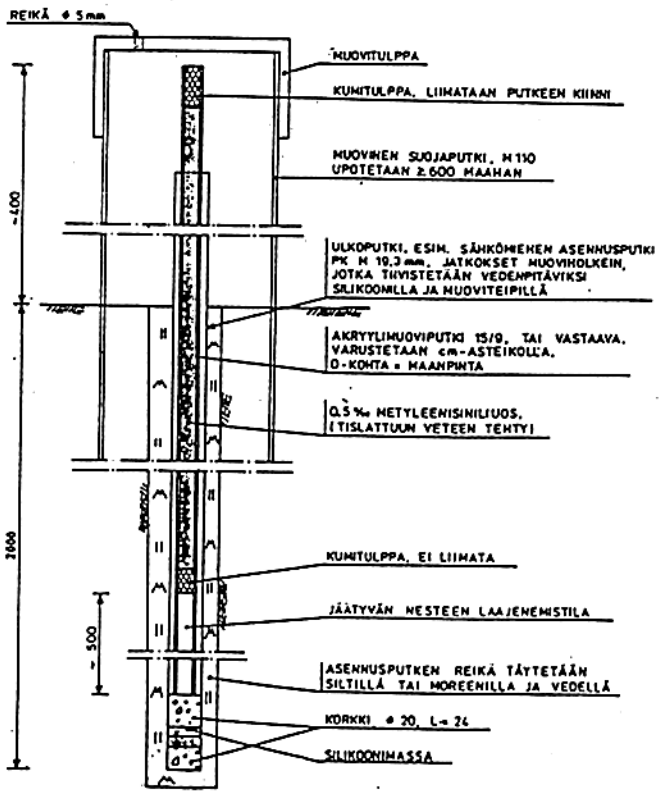
Routamittarissa oli sisäkkäin kaksi akryylimuoviputkea, joista ulommainen oli suojaputki ja sisempi toimi mittaputkena.

Maahan lyötyyn tärykaira– tai heijarikairareikään (Ø 32 mm) työnnettiin alapäästään tulpattu muovinen suojaputki (esimerkiksi asennusputki PK M 19,3 mm). Suojaputken sisään laitettiin varsinainen routamittari, metyleenisiniliuoksella täytetty akryyliputki. Routamittarin alapäästä noin 0,5 m:n etäisyydelle työnnettiin kumitulppa, joka putkessa olevan liuoksen jäätyessä ja laajentuessa työntyi alaspäin päästämättä liuosta ulos mittaputkesta. Asennusreiän ja suojaputken välinen rako täytettiin veteen sekoitetulla hienojakoisella maa–aineksella. Maanpäälle asennettiin PEH 110–muoviputkesta suoja mittarille.

Asennusputken ja routamittarin väliin jäävässä raossa saattoi lämpöä nousta ylöspäin, johtuen alempien maakerrosten korkeammasta lämpötilasta. Tämä voitiin estää valitsemalla maahan asennetun suojaputken sisähalkaisija ja akryyliputken ulkohalkaisija mahdollisimman lähelle toisiaan. Routamittarin suojaksi asennetussa (110 mm) muoviputkessa todettiin lievää huuruttumista. Joskus routamittari oli huurtunut vähän suojaputkeen kiinni. Routaputken pintaan sivelty silikoni esti routaputken jäätymisen kiinni suojaputkeen ja samalla pienensi myös lämpövuotoa putkien välisessä raossa.

Mittausmenetelmä antaa hieman liian suuria arvoja, sillä putkessa oleva neste jäätyy 0 ^{0}C:ssa, kun taas maa jäätyy jonkin verran alemmassa lämpötilassa. Kuvassa 13 on esitetty periaatekuva ns. Gandahlin routamittarista.

ROUDAN SYVYYSMITTARI



Kuva 13. Gandahlin routamittarin periaatekuva (Vaasan vesi– ja ympäristöpiiri).

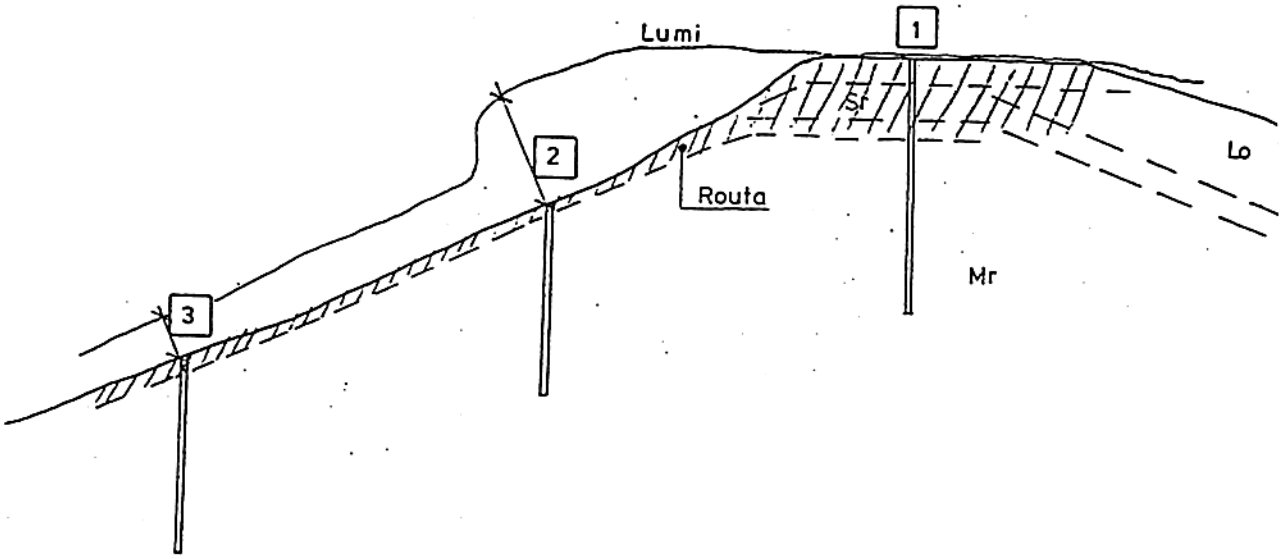
5.3 Lumen syvyys

Routamittareiden vierestä havaittiin lumipeitteen paksuus routamittauksen yhteydessä. Lumen paksuus mitattiin mittanauhalla tai –latalla kohtisuoraan maanpintaan nähden. Mittauksen jälkeen "lumitilanne" palautettiin ennalleen lapioimalla kaivettu kuoppa täyteen. Liitteessä 3 on esitetty roudan syvyysmittauksen yhteydessä mitattu lumen syvyys.

Eräissä poikkileikkauksissa kuivan luiskan kanttiin muodostui runsaslumisina talvina suuriakin kinoksia ilmansuunnasta, vallitsevasta tuulen suunnasta ja padon taustan puustosta riippuen (kuvat 14 ja 22 – 26).

Esimerkki Kalajärven allas Pl 72+00 (17.02.1984)

Mittari	Lumi (m)	Routa (m)
1	0,05	1,22
2	1,60	0,14
3	0,75	0,26



Kuva 14. Esimerkki lumi- ja routamittauksista.

5.4 Patorakenteen lämpötilahavainnot

Patorakenteen lämpötilojen seuraamiseksi Kyrkösjärven, Kalajärven ja Hirvijärven patojen yhteen poikkileikkaukseen asennettiin termopareja usealle syvyydelle sekä padon harjalle että kuivaan luiskaan (kuvat 12, 21 ja 30).

Liitteessä 6 on esitetty Hirvijärven, Kalajärven ja Kyrkösjärven padoissa talvina 1984 – 85, 1985 – 86 ja 1986 – 87 tehtyjen lämpötilamittausten tulokset sekä Kyrkösjärven padon lämpötila–anturi 8:n kaikki havaintotulokset.

Alimmat termoparit olivat 2,5 – 3,0 metrin syvyydellä padon pinnasta lukuunottamatta Kyrkösjärven padon mittauspistettä 8, jossa alin termopari oli 7,6 metrin syvyydellä padon harjalta.

Tämän viimeksimainitun mittauspisteen lämpötilahavaintojen perusteella voitiin määrittää patorakenteen lämpötilagradientti.

Termoparin muodosti kupari/konstantaani (HONEYWELL–MODEL 1W2P4) johdin, joka oli tinattu päästä noin 15 mm:n matkalta yhteen.

Maahan täry– tai heijarikairalla tehtyyn reikään asennettiin termoparikimppu, joka koostui teipillä yhteen liitetyistä määräsyvyydelle tulevista antureista. Asennusreiän ja kimpun välinen rako täytettiin veteen sekoitetulla hienojakoisella maalietteellä. Maan päälle asennettuun PEH 110 suojaputkeen tulevien termoparien johtoihin liitettiin mittauksessa mittarijohto banaanikoskettimella (kuva 21).

Lämpötilat mitattiin mittarilla NEWPORT 268–TC1, jonka näytön erotuskyky oli 1^{0}C. Termoparien lämpötiloja mitattaessa mittari oli autossa yli +5 ^{0}C:n lämpötilassa.

Mittarin ja mittausjohtimien kalibrointi tarkistettiin syksyisin sekä tarpeen mukaan, aina kun epäiltiin mittarin toimivuutta , kiehuvassa vedessä (100 °C) ja sulavassa jäässä (0 °C). Käytetyistä banaanikoskettimista ei todettu olevan haittaa mittaustarkkuudelle tai mittarin toimivuudelle. Kalibroitaessa koskettimilla ja ilman oli mittari näyttänyt samaa tulosta.

Suojaputkessa PEH 110 banaaniliittimiin höyrystynyt kosteus tai liittimen ruuvien löystyminen saattoi antaa väärän mittaustuloksen. Tarkkaavaisella työskentelyllä voitiin tästä johtuvat virhetulokset estää.

5.5 Routanousuhavainnot

Kyrkösjärven maapadon tutkimuspoikkileikkaukseen Pl 57+00 asennettiin routanousun seuraamiseksi 3 routanousumittaria (kuvat 12, 15, 27 ja 28).

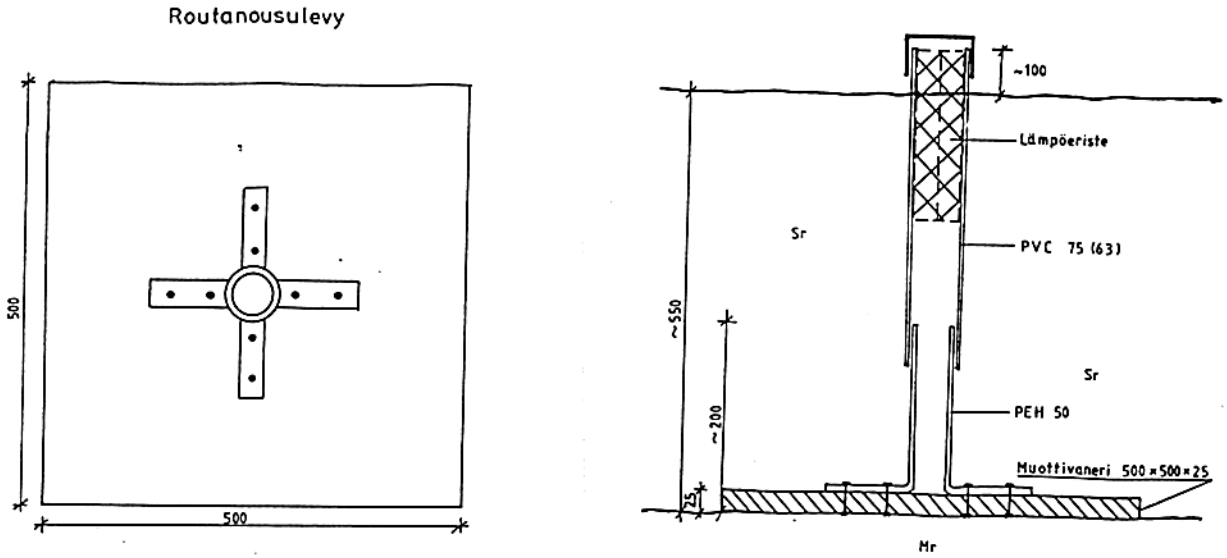
Liitteessä 5 on esitetty routanousuhavaintojen tulokset.

Maapadon harjalta kaivettiin moreenipinta paljaaksi. Tasoitetulle moreenipinnalle asennettiin 500 x 500 x 27 mm muottivanerilevy. Levyyn kiinnitettiin Ø 90/100 mm PEH muoviputki. Suojaputkessa PEH 110 käytettiin lämpöeristettä estämään pakkasen pääsy levytasolle. Putkien jatkos liikkui vapaasti routanousun vaikutuksesta. Padon harjan sorakerros rakennettiin lopuksi alkuperäiseen muotoon ja tiiveyteen.

Routanousun mittaus tapahtui levyn keskeltä, Ø 90 mm muoviputken sisältä, jolloin mittauskohta oli joka kerta sama. Mittaustulosten tarkkuuden varmistamiseksi tehtiin lähettyville kiintopiste.

Kyrkösjärven altaalla Pl 57+00 routanousulevyt asennettiin 17.11.1983 moreenipadon yläpintaan tasolle +82,45, padon harjankorkeuden ollessa +82,95. Levyjen peitesyvyys oli 0,50 m. Moreenipatoa korotettiin lokakuussa 1985 soralla keskimäärin 0,50 m.

Tällöin routanousulevyjen muoviputkea jatkettiin vastaavalla mitalla. Nykyiseksi harjakorkeudeksi tuli +83,45 ja routanousulevyjen peitesyvyydeksi 1,00 m.



Kuva 15. Routanousulevyn periaatekuva päältä ja sivulta.

5.6 Padon harjaosan vedenläpäisevyys

Hirvijärven, Kalajärven, Kivi- ja Levalammen ja Liikapuron maapatojen useissa poikkileikkauksissa tehtiin kesällä 1979 vedenläpäisevyyden mittauksia padon harjaosassa. Mittauksia suoritettiin harjan routimisvyöhykkeessä ja sen alapuolella tarkoituksena selvittää routimisen vaikutusta vedenläpäisevyyteen (kuva 32). Vertaamalla mittaustuloksia padon rakennustyön aikaisiin valvontatuloksiin saatiin kuva routimisen vaikutuksesta tiiveyteen.

Koska Kalajärven padossa todettiin vedenläpäisevyyden kasvua, niin kesällä 1980 tehtiin padossa Pl 81+00 – 83+70 em. lisäksi yhdeksässä poikkileikkauksessa vedenläpäisevyyden määrityksiä.

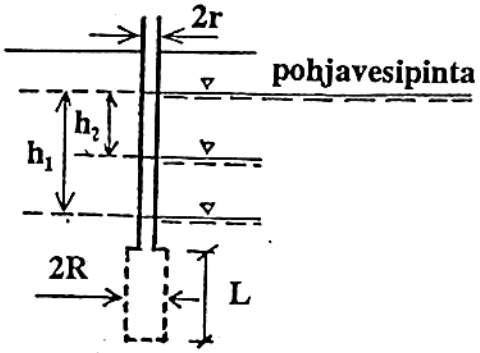
Kesällä 1993 suoritettiin vedenläpäisevyyden mittauksia Kalajärven, Hirvijärven ja Liikapuron padoissa samoissa poikkileikkauksissa ja samoilla syvyyksillä kuin 1979 tehdyt mittaukset.

Kyrkösjärven padolla määritettiin samoin kesällä 1993 vedenläpäisevyys routamittaus-poikkileikkauksien harjaosassa.

Cedergren (1967) on käsitellyt vedenläpäisevyyden määrittämistä maahan lyödyn putken avulla (kuva 16). Kuvan tapauksessa vesi on pumpattu pohjavesipinnan etäisyydeltä h_2 etäisyydelle h_1. Kuvassa esitetyn kaavan mukaan saadaan laskettua vedenläpäisevyyskerroin veden täysin kyllästämälle, äärettömän syvälle isotrooppiselle maakerrostumalle. Maa on isotrooppista vedenläpäisevyyden suhteen, kun vaakasuora

vedenläpäisevyyskerroin (k_x)on yhtä suuri kuin pystysuora vedenläpäisevyyskerroin (k_y) . Anisotrooppisuuden (kerrostuneessa maassa tavallisesti $k_x > k_y$) vaikutus otetaan huomioon jakamalla kärkikappaleen vaakamitat neliöjuurella $\sqrt{k_x/k_y}$, jolloin saadaan keskimääräinen vedenläpäisevyyskerroin $k = \sqrt{k_x k_y}$.

$$k = \frac{r^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln(\frac{L}{R}) \ln(\frac{h_1}{h_2}) \qquad (24)$$

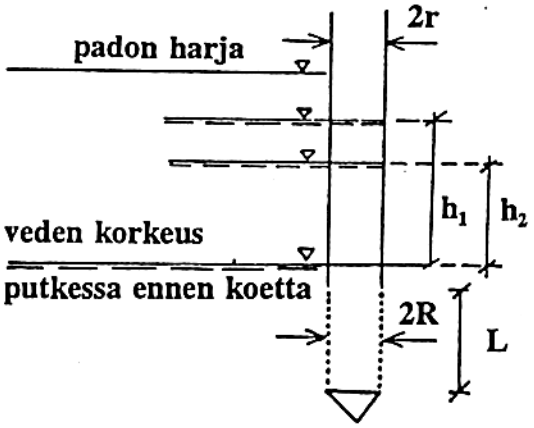


h_1, h_2 vesipinnat ajanhetkillä t_1 ja t_2
2r putken halkaisija
2R kärkikappaleen halkaisija
L rei'itetyn osan pituus (siiviläosa)

Kuva 16. Vedenläpäisevyyskertoimen määritys (Cedergren 1967).

Vedenläpäisevyyden mittausta varten lyötiin patoon sisähalkaisijaltaan Ø 41,7 mm mittausputken siiviläosa halutulle mittaussyvyydelle. Putken alaosa oli 0,5 metrin pituudelta rei'itetty. Reikien läpimitta oli 3 mm ja lukumäärä noin 150 kappaletta. Kullekin havaintosyvyydelle asennettiin erillinen mittausputki.

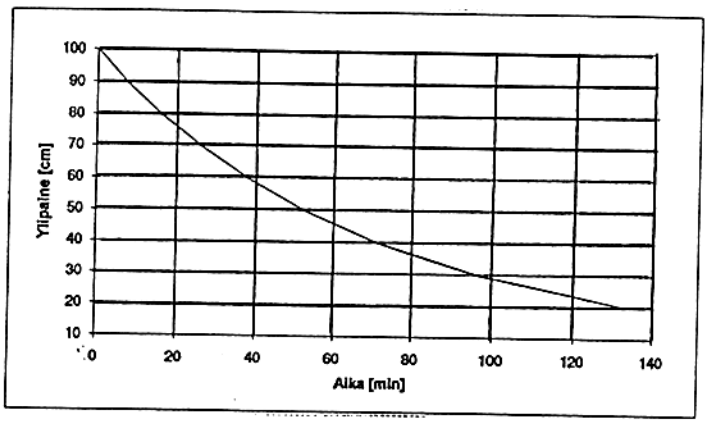
Vedenläpäisevyyskokeet tehtiin siten, että mittausputkeen lisättiin vettä niin, että saavutettiin mittauksen alussa 1 metrin ylipaine siivilän keskiosaan nähden. Tämän jälkeen mitattiin aina 0,10 m:n vedenpinnan laskuun kulunut aika. Vedenpinnan mittausvälineenä käytettiin sähköistä mittaluotia. Kokeen periaate on esitetty kuvassa 17.



2r putken halkaisija
2R kärkikappaleen halkaisija
h_1 100 cm:n ylipaine hetkellä t_1
h_2 ylipaine hetkellä t_2
L rei'itetyn osan pituus (siiviläosa)

Kuva 17. Vedenläpäisevyyskokeen suoritustapa.

Kokeiden tulokset voidaan esittää kuvan 18 mukaisina käyrinä.



Kuva 18. Vedenläpäisevyyskokeen mittaustulos käyränä.

Vedenläpäisevyyskertoimen arvot laskettiin kaavalla 24.

Anisotrooppisuuden huomioimisella ei ole kovinkaan suurta vaikutusta vedenläpäisevyyskertoimien arvoihin. Koe antaa lähinnä suurimman vedenläpäisevyyden arvon suuruusluokan.

Vedenläpäisevyyskokeiden tulokset sekä mahdollisuuksien mukaan työnaikaiset tarkkailutiedot samalta kohtaa patoa on esitetty taulukossa 11. Samassa taulukossa on esitetty, kuinka monta kertaa routa ulottui vedenläpäisevyyskertoimen mittaustasoille.

Työnaikaisten vedenläpäisevyysmittausten mukaan patomoreenin vedenläpäisevyyskertoimen keskiarvo ja keskihajonta olivat vaihdelleet seuraavasti eri padoissa. Hirvijärven padon vedenläpäisevyyskertoimen keskiarvo oli k= $10^{-7,55}$ m/s ja kaikkien kokeiden vedenläpäisevyyskertoimien vaihteluväli k= $10^{-6,5}$ – 10^{-8} m/s. Hautaperän, Kalajärven ja Kyrkösjärven patotöiden tarkkailutuloksista on esitetty yhteenveto patomoreenin kuivatilavuuspainon, vesipitoisuuden, tiiviysasteen ja vedenläpäisevyyskertoimen jakautumatiedot (Loukola 1985). Kalajärven padon vedenläpäisevyyskertoimien keskiarvo oli k= $10^{-7,23}$ m/s ja keskihajonnan mukainen vaihtelu k= $10^{-6,86}$ – $10^{-7,59}$ m/s. Kyrkösjärven padon vedenläpäisevyyskertoimien keskiarvo oli k= $10^{-7,36}$ m/s ja keskihajonnan mukainen vaihtelu k= $10^{-7,04}$ – $10^{-7,68}$ m/s. Hautaperän padon moreenin vedenläpäisevyyskertoimen keskiarvo oli k= $10^{-7,73}$ m/s ja keskihajonnan mukainen vaihtelu k= $10^{-7,06}$ – $10^{-8,4}$ m/s. Vedenläpäisevyyskertoimen suuri hajonta viittaa sullontatyön epätasaiseen tulokseen, sillä rakeisuudeltaan em. patojen tiivistemoreenit eivät eroa merkittävästi.

Hautaperän, Hirvijärven, Kalajärven ja Kyrkösjärven tiivistemoreenien padossa mitattujen vedenläpäisevyyskertoimien keskiarvojen vaihteli välillä k= $10^{-7,26}$ – $10^{-7,72}$ m/s. Hautaperän, Kalajärven ja Kyrkösjärven patomoreenien vedenläpäisevyyskertoimien keskihajonnan mukainen vaihteluväli oli k= $10^{-6,86}$ – $10^{-8,4}$ m/s.

Kesällä 1979 tehtyjen kokeiden tuloksista havaitaan, että Hirvijärven ja Kivi- ja Levalammen mittauksissa ei ole todettu läpäiseviä kerroksia kaikkien havaintojen vedenläpäisevyyskertoimien ollessa parempia kuin vaatimustaso, k≤$10^{-6,5}$ m/s.

Liikapuron maapadossa oli havaittavissa hieman vaatimusta huonompia arvoja noin 1,5 metrin syvyydelle padon harjalta eli altaan HW–tasolle.

Kalajärvellä oli niin ikään havaittavissa vaatimustasoa huonompia vedenläpäisevyyskertoimen arvoja 2,5 metrin syvyyteen saakka padon harjalta ja erityisesti poikkileikkauksessa Pl 78+00.

Koska Kalajärven maapadossa oli vedenläpäisykokeiden perusteella havaittavissa löyhtymistä,niin suoritettiin padolla jatkotutkimuksia. Kokeet suoritettiin kesällä 1980 harjan pintaosissa ja tuloksia verrattiin rakennusaikaisiin määrityksiin. Rakennusaikaiset arvot eivät sinällään ole vertailukelpoisia, mutta niistä voidaan havaita vedenläpäisevyyden suuruusluokka.

Tuloksista (taulukko 11, sivut 51 ja 52) on nähtävissä systemaattinen löyhtyminen Kalajärven maapadon harjan pintaosissa. Löyhtymisen voidaan katsoa tapahtuneen aina tasolle +105,50, mikä on sama kuin altaan pitkäaikainen HW. Poikkileikkauksessa Pl 83+30 on myös nähtävissä poikkeuksellisen huono arvo tasolla +105,50. Havaintojen perusteella voidaan päätellä routimisen muuttavan vedenläpäisevyysarvoja.

Vuonna 1993 suoritetut mittaukset osoittavat Hirvijärven ja Liikapuron padoissa vedenläpäisevyyden vähäistä kasvua verrattuna aikaisempiin mittauksiin. Kalajärven tuloksissa on hieman heilahtelua, mutta kyllä niistäkin voi päätellä vedenläpäisevyyden kasvaneen. Kyrkösjärven mittaustuloksia voi verrata vain työnaikaisiin tarkkailutuloksiin, joihin nähden vedenläpäisevyys on jonkin verran kasvanut.

Suurimmillaan vedenläpäisevyys on kasvanut Hirvijärven padon poikkileikkauksessa Pl 39+00 noin 10-kertaiseksi, mutta patotöiden tarkkailutulosten keskihajonnan mukainen vaihtelu voi olla samaa luokkaa. Toisaalta itse mittausmenetelmä ei ole tarkka eikä määritys ole tapahtunut täsmälleen samasta kohdasta. Yhteenvetona voidaan todeta, että vedenläpäisevyyden voitiin osoittaa kasvaneen, mutta kasvun suuruuteen ei näillä tiedoilla voida pitävästi arvioida.

5.7 Vesipitoisuuden määritys, in situ

Kyrkösjärven maapadon routatutkimuspoikkileikkauksissa (Pl 50+75 ja Pl 57+00) pyrittiin patoon asennetusta havaintoputkesta seuraamaan roudan sulamisvaiheessa-vesipitoisuuden vaihteluita padon harjaosan tiivistemoreenissa (kuva 33).

Poikkileikkauksessa Pl 50+75 havaintoputki asennettiin routamittarin 6 läheisyyteen ja poikkileikkauksessa Pl 57+00 routamittarin 8 lähelle.

Mittauksia suoritettiin sekä roudan sulamisvaiheen aikana että kesällä ja syksyllä. Havainnoinnin olisi pitänyt olla ympärivuotista, jolloin olisi paremmin saatu selville padon harjaosan maakerrosten vesipitoisuuden muutokset routaantumisen vaikutuksesta.

Radiometrinen luotaus tehtiin neutronimittarilla 10 cm:n välein 3 metrin syvyyteen asti. Neutronimittausmenetelmä (Vesihallitus 1984) soveltuu hyvin maankosteuden ajallisen vaihtelun määrittämiseen. Menetelmä perustuu nopeiden neutronien energian vähenemiseen niiden törmätessä maassa oleviin vety-ytimiin (Schmugge 1980). Koska maassa vetyä esiintyy lähes yksinomaan vedessä, hitaiden neutronien määrä (impulssilukema) on verrannollinen maan vesipitoisuuteen. Teoriassa vesipitoisuuden ja impulssilukemien suhdetta ei pystytä määrittämään, joten on käytettävä kokeellista

kalibrointia. Radioaktiivisen säteilyn vaikutusalue (ellipsoidi lähteen ympärillä) riippuu oleellisesti maankosteudesta. Morrison (1983) on esittänyt, että märälle maalle vaikutusalueen halkaisija on 7 – 15 cm ja kuivalle vastaavasti noin 25 cm.

Eri maalajeille on laadittava kullekin oma kalibrointikäyränsä (Tattari ja Granlund 1989). Tätä varten otettiin molempien havaintoputkien kohdalta maanäytteet 0,5 , 1,0 , 1,5 , 2,0 ja 2,5 metrin syvyyksiltä sekä Pl 50+75 vielä 3,0 metrin syvyydeltä. Kaikkien näytteiden maalaji oli silttinen hiekkamoreeni.

Näytteet otettiin 30. ja 31.5.1985, jolloin routa oli poikkileikkauksessa Pl 50+75 täysin sulanut, mutta poikkileikkaus Pl 57+00 oli sula pinnasta noin 1,0 metrin syvyydelle, jonka alapuolella oli vielä routaa 0,5 metriä.

Kuvassa 19 on esitetty maanäytteiden tilavuusvesipitoisuus ja neutronimittausten tuloksista arvioidut tilavuusvesipitoisuudet havaintosyvyyksillä vuosina 1985 ja 1986. Yleensä mittaukset päästiin aloittamaan vasta sitten, kun routa oli jo ehtinyt täysin sulaa. Näissä mittauksissa ei esiintynyt mainittavia vesipitoisuuden muutoksia lukuunottamatta poikkileikkauksen Pl 50+75 tuloksia vuodelta 1985.

Kyrkösjärven patotyön tarkkailutulosten mukaan padon tiivistemoreenin kuivatilavuus-painon ja vesipitoisuuden(paino–%) keskiarvot olivat γ_d = 19,1 kN/m^3 ja w = 9,6 %.

Tilavuusvesipitoisuuden (w_{til}) ja painoprosentteina ilmoitetun vesipitoisuuden (w) välinen vuorosuhde on esitetty kaavalla (25)

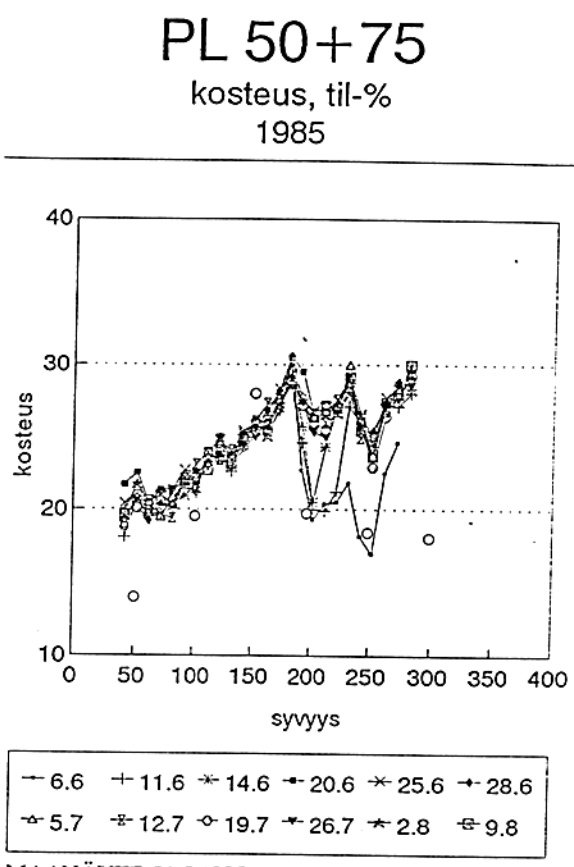
$$w_{til}\ \% = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}\, w\ \% \qquad (25)$$

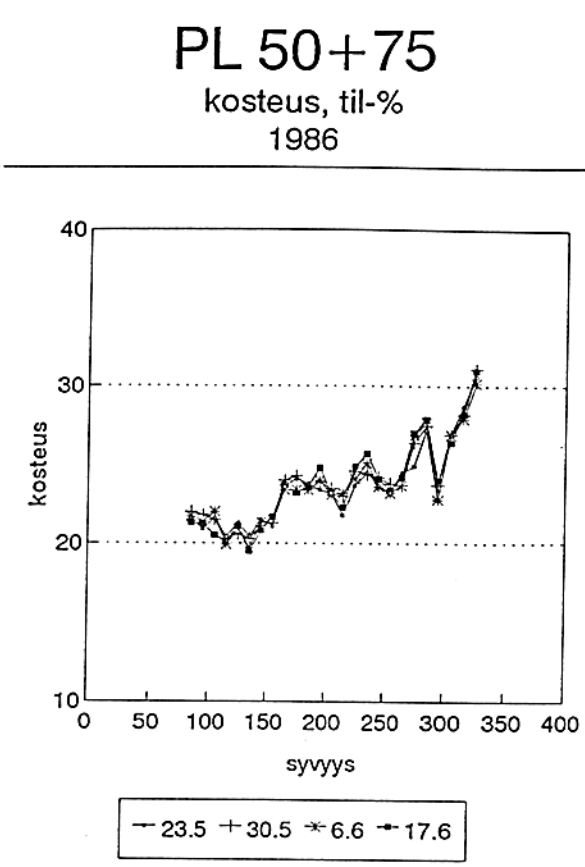
Poikkileikkauksesta Pl. 50+75 31.5.1985 otettujen maanäytteiden ja 6.6.1985 suoritettujen mittausten vesipitoisuudet olivat varsin lähellä toisiaan, kun taas poikkileikkauksessa Pl. 57+00 vesipitoisuuksien erot olivat suurempia.

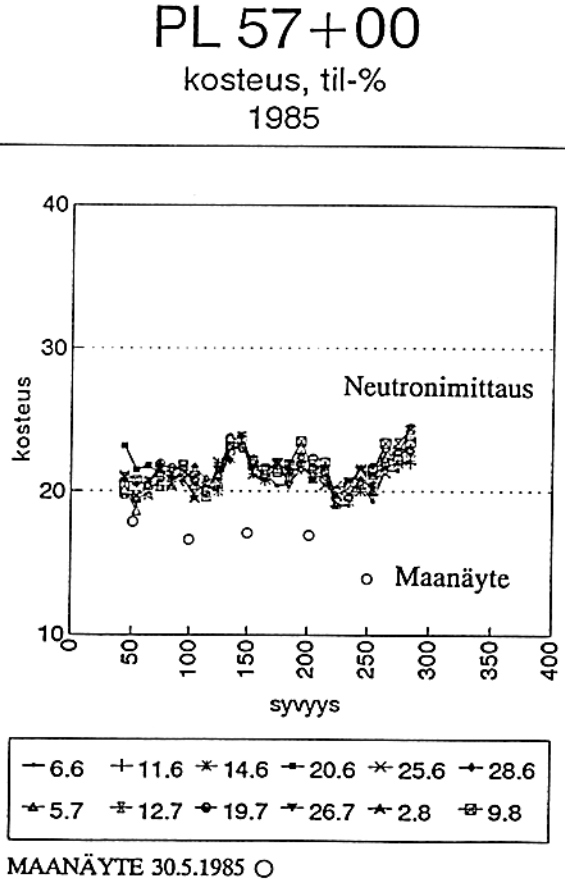
Kesäkuun alkupuolen mittaustuloksista voitiin havaita sulamassa oleva kerros 1,0 – 1,5 metrin syvyydellä. Samoin maanäytteiden vesipitoisuuksissa oli suurin arvo sulaneen kerroksen alaosassa.

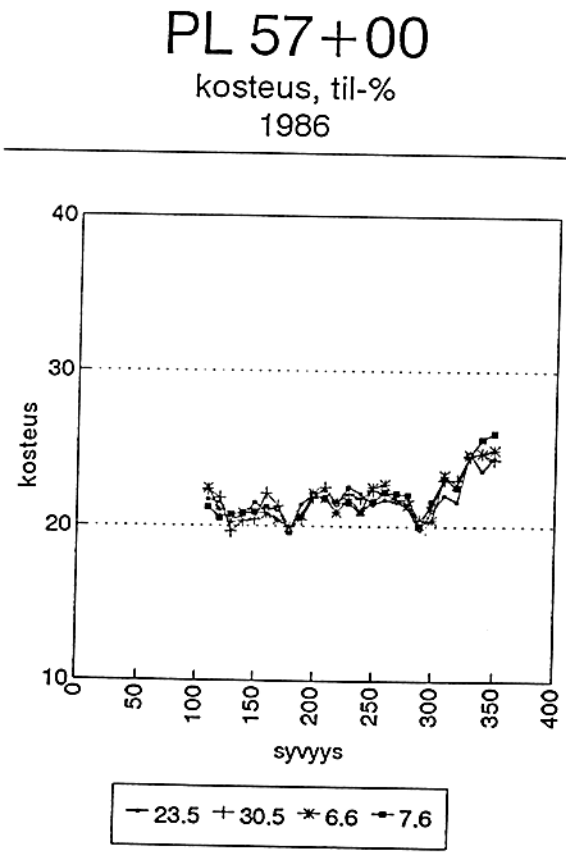
Lisäksi voitiin vesipitoisuuksien vaihteluista havaita maapatorakenteen kerroksellisuus, sillä esimerkiksi 1,8 , 2,3 ja 2,8 metrin syvyyksillä vesipitoisuus oli korkeampi. Tämä voitaisiin tulkita kerrosrajaksi, jota olettamusta vahvistavat työnaikaiset tarkkailutu-lokset.

Yhteenvetona voidaan todeta, että mittausten mukaan poikkileikkauksessa Pl 50+75 vesipitoisuuden vaihtelu eri vuosina routarajan alapuolella oli suurempi kuin poikkileikkauksessa Pl 57+00. Tästä voitaisiin päätellä, että em. patopoikkileikkaukset erosivat toisistaan mm. moreenin ominaisuuksien ja patotyön tasalaatuisuuden osalta.









Kuva 19. Neutronimittauksilla saadut ja maanäytteistä määritetyt tilavuusvesipitoisuudet.

Taulukko 10. Patojen sijainti ja valittu säähavaintoasema

Pato, kunta, valmistumisvuosi	Vesi- ja ympäristöpiiri	Patotyyppi *)	Padon korkeusasema (m)		Säähavaintoasema, korkeustaso (m)
			Padon ympäristö	Padon harja	
Maarian maapato, Turku, 1980	Tuvy	VP	+10	+20.60	Turku, lentoasema, +51
Raision tekojärven maapato, Raisio, 1974	Tuvy	HP	+25	+32.50	Turku, lentoasema, +51
Silvolan maapato, Helsinki, 1962	Hevy	VP	+25	+44.60	Helsinki-Vantaan lentoasema, +53
Kuokkastenkosken maapato, Nurmes, 1965	PKvy	VP	+97	+105.50	Valtimo kk, +115
Puntarikosken maapato, Joensuu, 1958	PKvy	VP	+80	+89.30	Joensuu, lentoasema, +116
Kuurnan maapato, Joensuu, 1971	PKvy	VP	+ 75	+85.00	Joensuu, lentoasema, +116
Kyrkösjärven maapato, Seinäjoki, 1980	Vavy	HP	+ 75	+83,50	Kauhava, lentokenttä, +42
Hirvijärven maapato, Nurmo, 1973	Vavy	HP	+80	+90.90	Kauhava, lentokenttä, +42
Hipin pato, Nurmo, 1987	Vavy	HP	+40	+37.50	Kauhava, lentokenttä, +42
Varpulan maapato, Nurmo, 1973	Vavy	HP	+85	+94.00	Kauhava, lentokenttä, +42
Kalajärven maapato, Peräseinäjoki, 1976	Vavy	HP	+100	+107.80	Peräseinäjoki, Haukineva, + 102
Liikapuron maapato, Jalasjärvi 1966	Vavy	HP	+130	+134.70	Peräseinäjoki, Haukineva, +102
Säläsjärvi, Jurva 1978	Vavy	HP	+90	+91.70	Ylistaro, Pelma, +26
Kivi- ja Levalampi, Jurva, 1975	Vavy	HP	+75	+80.40	Ylistaro, Pelma, +26
Patanan maapato, Veteli, 1967	Kovy	VP	+110	+125,50	Halsua kk, +128
Venetjoen maapato, Halsua, 1966	Kovy	HP	+125	+134.50	Halsua kk, +128
Kaitforsin maapato, Alaveteli, 1983	Kovy	HP	+40	+46.00	Halsua kk, +128
Hautaperän maapato, Haapajärvi, 1975	Kovy	HP	+85	+101.85	Nivala kk, +79
Uljuan maapadot, Pulkkila, 1970	Ouvy	VP HP	+70	+81.80	Vaala, Pelso, +113,
Petäjäskosken pato Muurola (Rovaniemi) 1957	Lavy	VP	+55	+65.00	Rovaniemi, lentoasema, +195
Vajukosken pato, 1981 Sodankylä	Lavy	VP	+190	+206	Sodankylä, observatorio, +178

*) HP = homogeeninen maapato ja VP = vyöhykepato

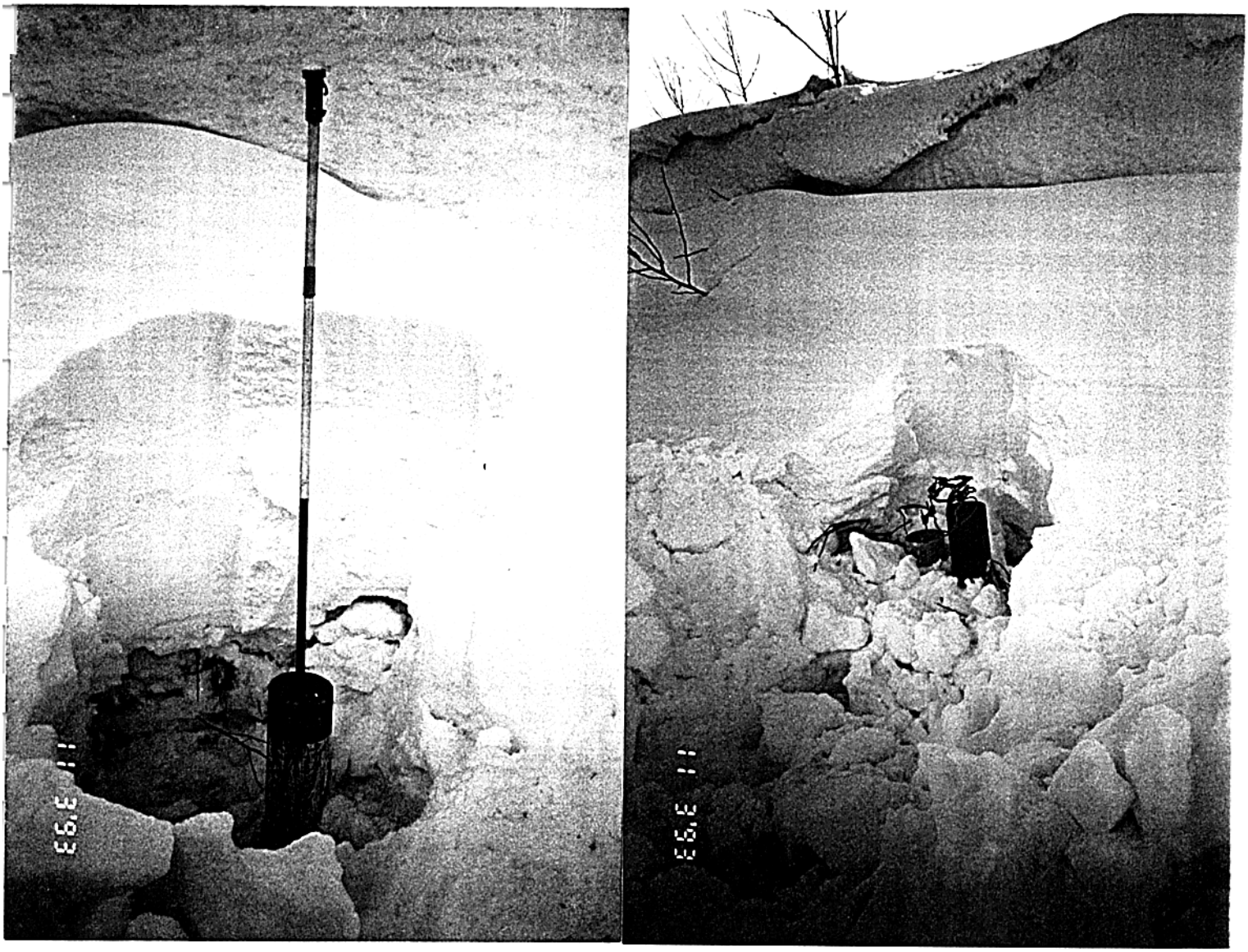
Taulukko 11. Maapadon vedenläpäisevyyskertoimen määritys kenttäkokeella.

Pato	Putki nro	Putken alapään korkeus	Vedenläpäisevyyskerroin k=10⁻⁴(m/s) 1979	1980	1981	1993	Rakentamisen aikainen vedenläpäisevyys	Routaantumi-miskertoja havaintoaikana
Kalajärven pato, HW∇ 105,50								
Pl. 10+00	1	105.50	−6,22					
	2	105.00	−6,68				−6,80	
	3	104.50	−7,60				−6,96	
Pl. 20+00		106.50						
		106.00						12
	1	105.50	−6,88			−6,73	−7,05	9
	2	105.00	−6,91				−7,14	6
	3	104.50	−6,81				−7,99	2
Pl.66+00	1	105.50	−6,96					
	2	105.00	−7,41					
	3	104.50	−7,10				−7,20	
	28	102.96	−7,08					
Pl. 72+00		106.50						
		106.00						12
	1	105.50	−6,89			−7,23		9
	2	105.00	−7,66			−7,17		5
	3	104.50	−7,36			−6,93	−7,74	2
								1
Pl. 78+00	1	105.50	−6,36					
	2	105.00	−5,07					
	3	104.50	−6,23				−7,30	
Pl. 81+00	1	106.03		−6,34				
	2	105.54		−6,31				
	3	105.01		−7,44				
Pl. 81+70	1	106,00		−6,02				
	2	105.47		−6,75				
	3	105.02		−6,80			−6,68	
	4	104.53		−6,81				
Pl. 82+10	1	105.94		−6,05				
	2	105.46		−6,55				
	3	104.98		−6,44			−7,36	
	4	104.38		−7,43				
Pl. 82+50	1	105.99		−6,23				
	2	105.53		−6,61				
	3	105.04		−7,37				
	4	104.52		−6,95				
Pl. 82+70	1	106.07		−6,02				
	2	105.57		−6,19				
	3	105.08		−6,62				
	4	104.57		−6,66				
Pl. 82+90	1	106.01		−6,09				
	2	105.52		−6,79				
	3	105.06		−6,73			−7,06	
Pl. 83+10	1	106.02		−6,18			−7,29	
	2	105.49		−6,22				
	3	105.03		−6,68				
	4	104.42		−7,80				
Pl. 83+30	1	105.95		−6,00			−6,94	
	2	105.48	−6,53	−5,90				
	3	105.00	−6,17	−7,46			−7,25	
	4	104.48	−6,34	−7,76				
Pl. 83+70	1	106.07		−5,96				
	2	105.55		−6,34				
	3	105.05		−6,70			−6,78	
	4	104.49		−7,81				
Pl. 84+10	1	106.08		−6,18				
	2	105.57		−6,69				
	3	105.13		−7,20			−7,09	
	4	104.57		−7,79				

Taulukko 11. (jatkoa) Maapadon vedenläpäisevyyskertoimen määritys kenttäkokeella.

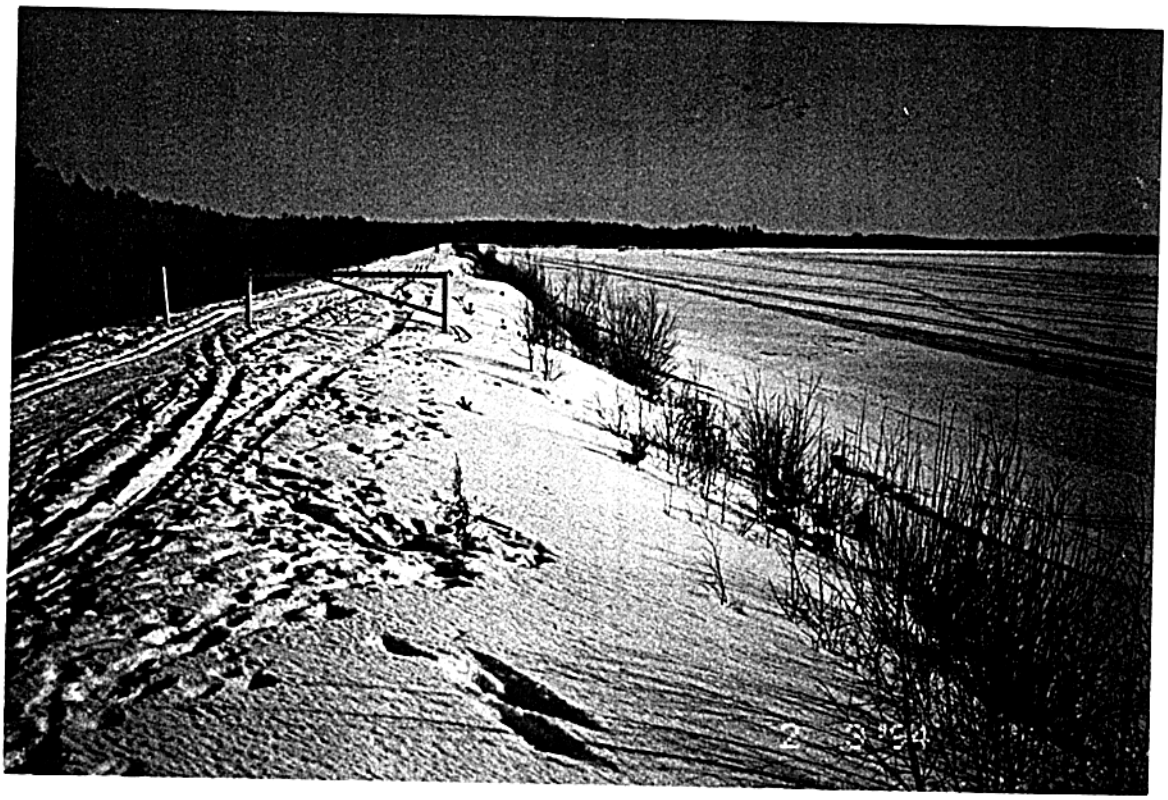
Pato	Putki nro	Putken alapään korkeus	Vedenläpäisevyyskerroin k=10⁻⁸(m/s) 1979	1980	1981	1993	Rakentamisen aikainen vedenläpäisevyys	Routaantumi-miskertoja havaintoaikana
Kyrkösjärven pato, HWV 81.25								
Pl. 49+99	11	81.30			-6,01			
Pl. 50+75		82.00						10
	1	81.50				-6,98		5
	2	81.00				-6,98		3
	3	80.50				-6,89		1
Pl. 57+00		82.00						12
	1	81.50				-7,51		7
	2	81.00				-7,21		4
	3	80.50				-8,73		1
	68	77.25			-6,87			
	69	78.50			-7,12			
	70	78.50			-7,11			
	75	76.00			-7,20			
	76	77.00			-7,59			
	77	78.00			-7,99			
Kivi- ja Levalammen pato, HWV 78.70								
Pl. 8+05	1	78.50	-7,21					
	2	78.20	-7,66					
	3	77.70	-7,30					
Pl. 9+43	1	78.70	-7,21					
	2	78.20	-7,58					
	3	77.70	-7,39					
Pl.12+73	1	78.70	-6,91					1
	2	78.20	-8,34					1
	3	77,70	-8,42					
Hirvijärven pato, HWV 88.75								
Pl. 39+00		89.50						12
		89.00						8
	1	88.50	-7,80			6,74		2
	2	88.04	-8,43			-7,55		
PL. 8+00	1	88.50	-7,36					
	2	88.00	-7,36					
Liikapuron pato, HWV 133.00								
Pl. 12+00		134.00						12
		133.50						8
	1	133.00	-6,13			-5,97		5
	2	132.50	-6,59			-6,36		1
	3	132.00	-7,06			-6,89		1
Pl. 14+20		134.00						12
		133.50						6
	1	133.00	-6,56			-6,67		2
	2	132.50	-6,96			-6,80		1
	3	132.00	-7,20			-6,96		
Pl. 24+20	1	133.00	-6,18					
	2	132.50	-6,48					
	3	132.00	-6,64					

Kuva 20. Roudan syvyyden mittaus routamittarilla.



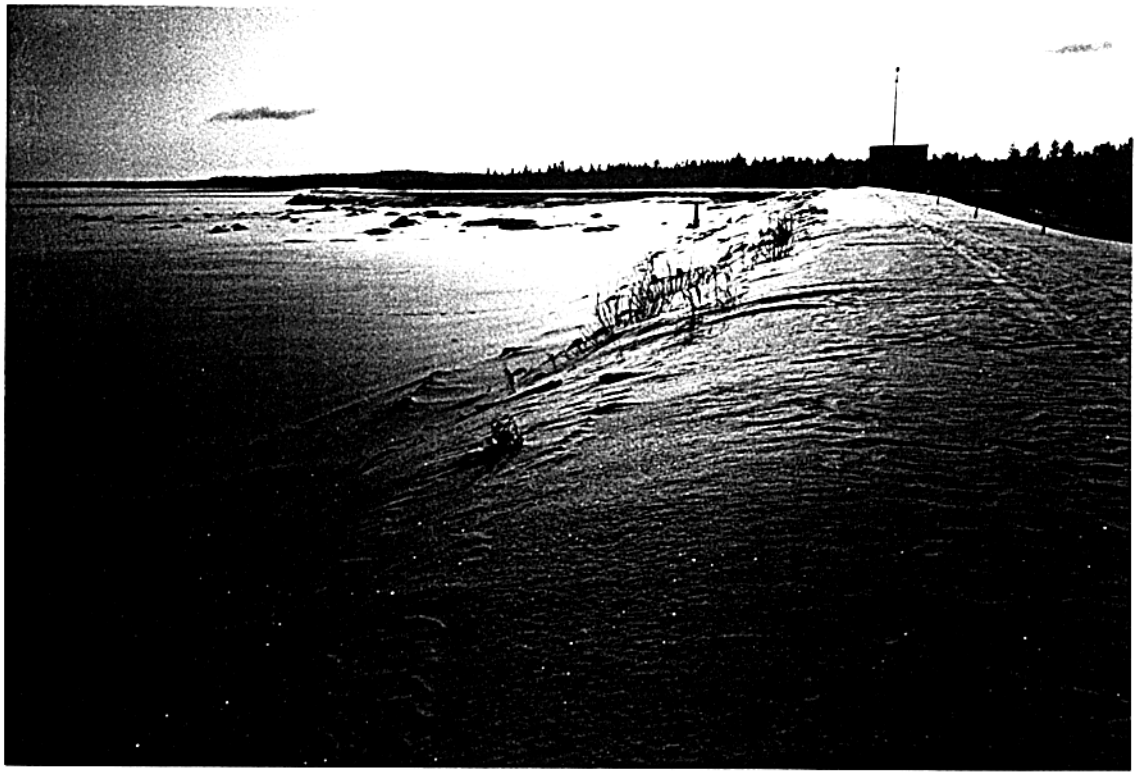
Kuva 21. Roudansyvyysmittari ja lämpötilan mittausjohdot Kalajärven padon Pl 72+00 kuivassa luiskassa keväällä 1993.

Kuva 22. Lumitilanne Kalajärven padolla keväällä 1994.

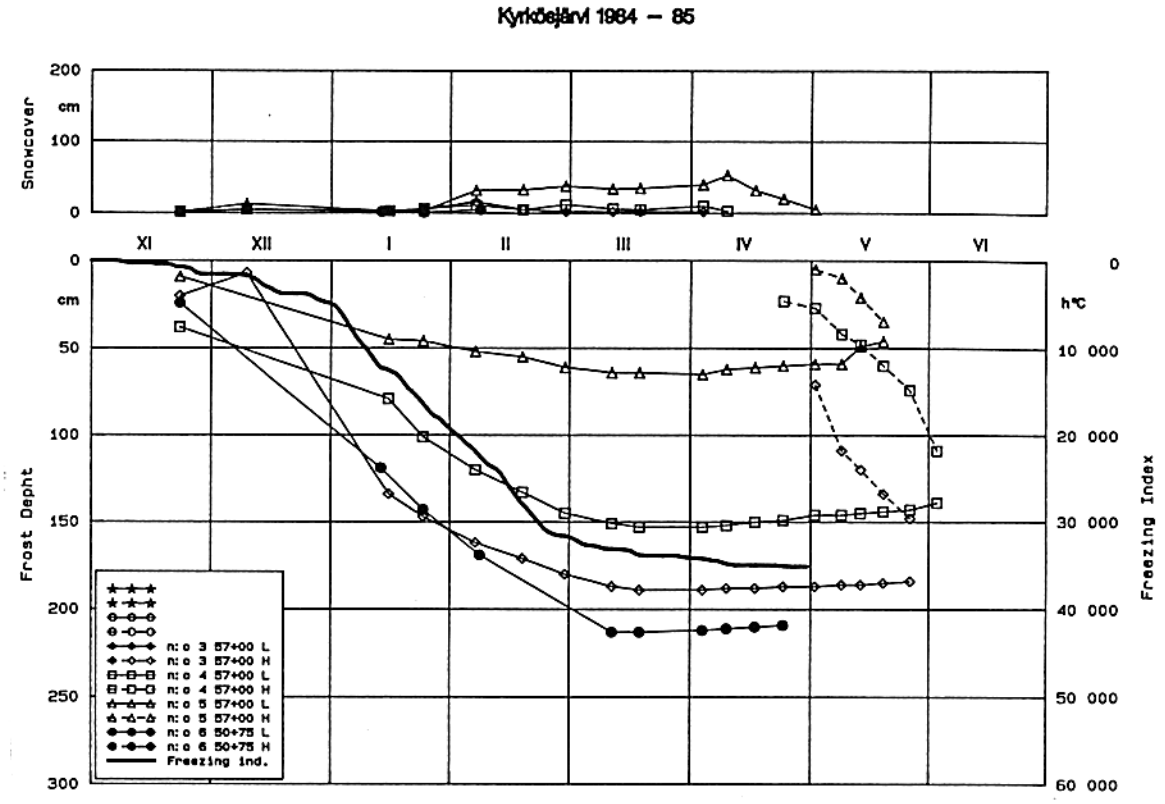


Kuva 23. Lumitilanne Kyrkösjärven padon harjalla ja altaan puoleisessa luiskassa keväällä 1994.

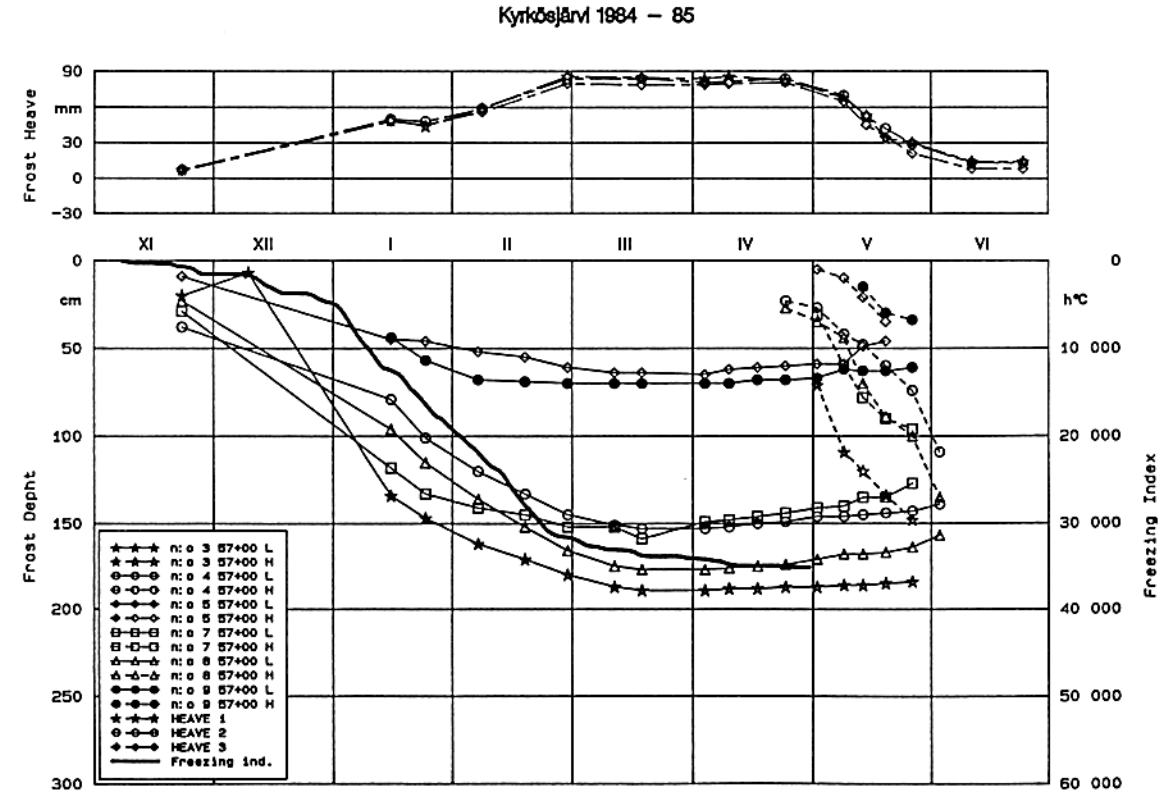
Kuva 24. Lumitilanne Uljuan padon kuivassa luiskassa keväällä 1994.



Kuva 25. Lumitilanne Uljuan padon harjalla ja altaan puoleisessa luiskassa keväällä 1994.



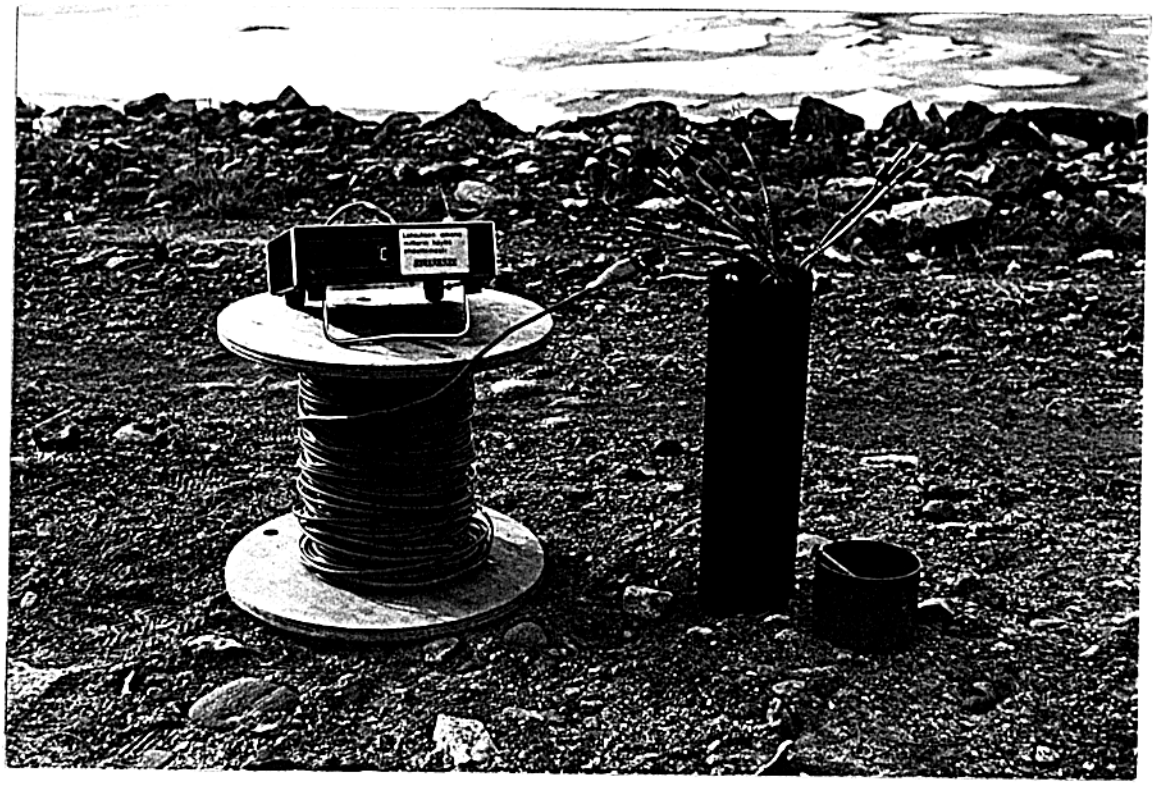
Kuva 26. Esimerkki roudan ja lumen syvyyden sekä pakkasmäärän tulostuksesta.



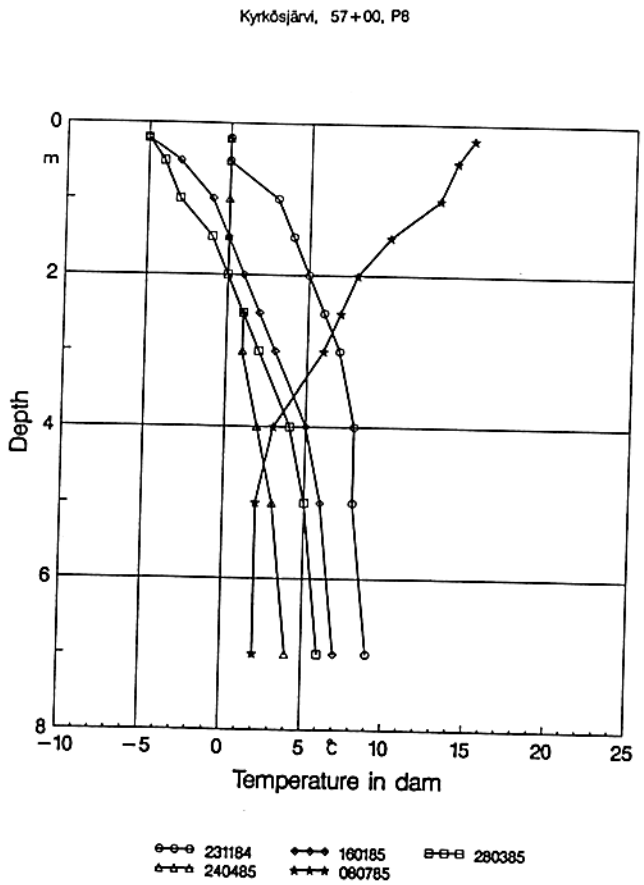
Kuva 27. Esimerkki routanousun ja roudan syvyyden sekä pakkasmäärän tulostuksesta.

Kuva 28. Routanousumittareiden asentaminen Kyrkösjärven padon poikkileikkaukseen Pl 57+00 moreenin pinnalle.

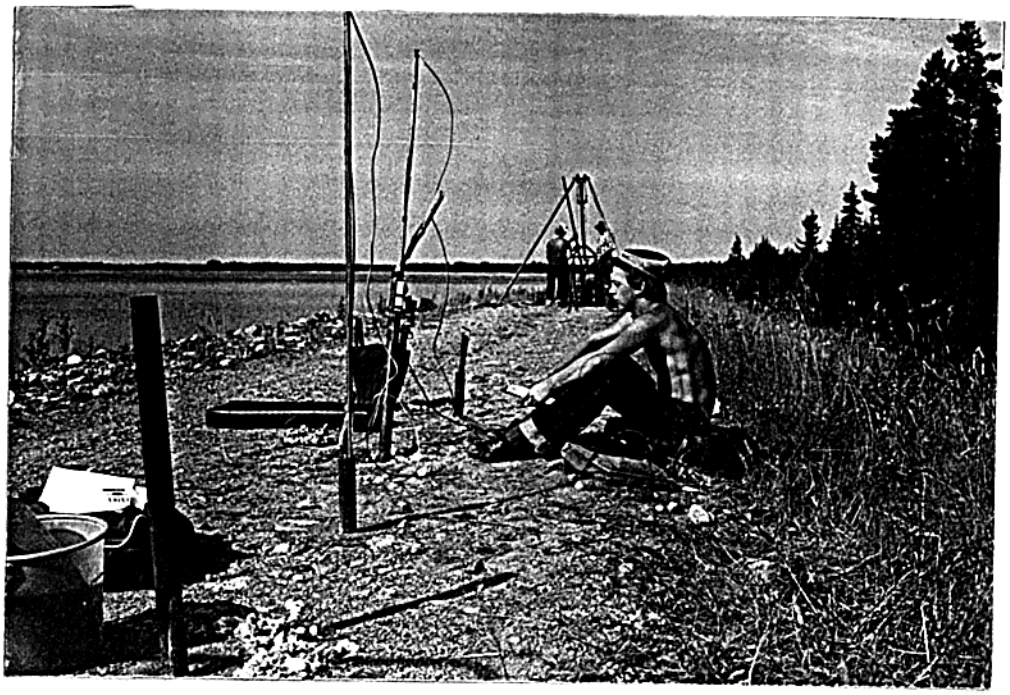
Kuva 29. Routahavaintomittareiden näkyvissä olevat mustat PEH 110 suojaputket.



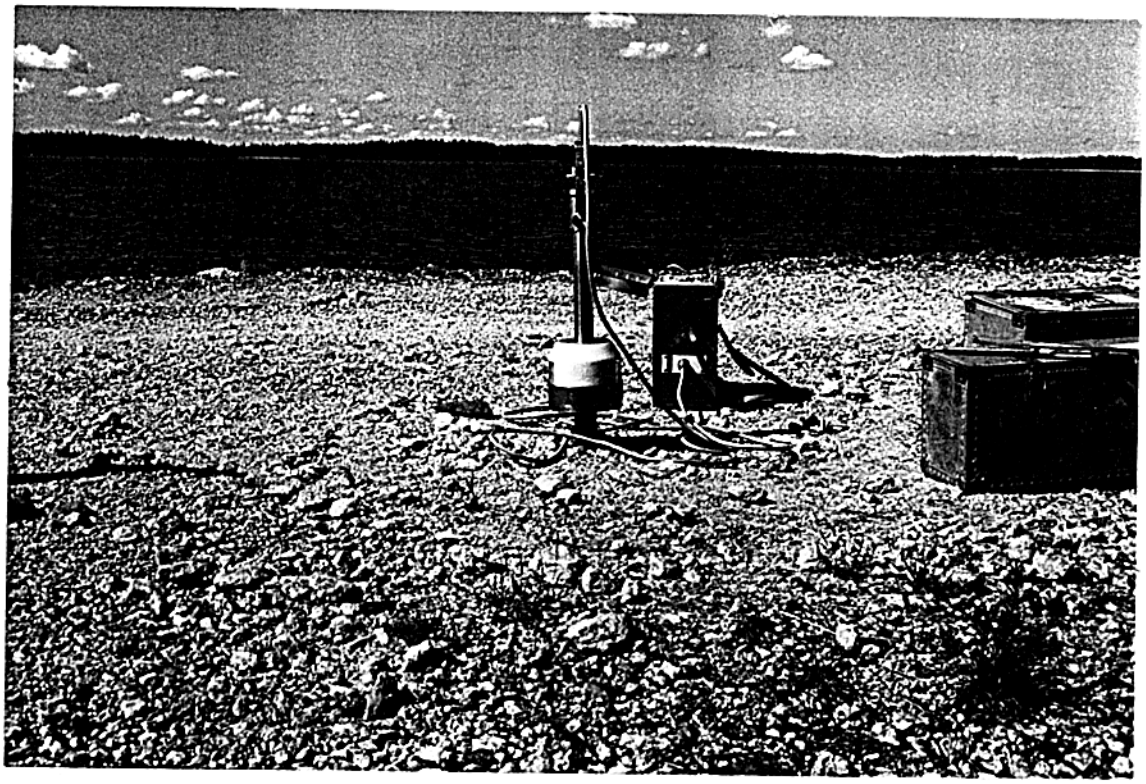
Kuva 30. Maapadon sisälämpötilan mittauskalusto.



Kuva 31. Esimerkki lämpötilamittausten tulostuksesta.



Kuva 32. Etualalla on käynnissä vedenläpäisevyyden kenttämittaus ja taustalla mittausputkien asennus.



Kuva 33. Vesipitoisuuden radiometrinen mittauskalusto Kyrkösjärven padolla PI 50+75.

6 TUTKITTUJEN PATOJEN RAKENTEET JA ROUDAN MAKSIMISYVYYDET

6.1 Maarian pato

Aurajokeen laskeva Paattistenjoki oli padottu Maarian padolla Turun kaupungin raakavesivarastoksi.

Maarian pato oli vuonna 1980 valmistunut vyöhykepato, jonka tiivisterakenteena oli suodatinkankaan ympäröimä savisydän.

Padon harjan taso oli +20,70 m tutkimuspoikkileikkauksessa Pl 1+90, johon syksyllä 1984 asennettiin routamittari padon harjan keskilinjalle. Altaan vesipinnan HW oli +18.00 m, joten padon kuivavara oli 2,7 m. Padon harjan rakenne oli seuraava:
- ylimpänä 0,6 m suojakerros louhetta,
- 0,5 m soraa,
- suodatinkangas ja
- padon tiivistyssydän savea.

Padon rakennekerrokset routamittarin kohdalla esitetään liitteessä 1 ja routamittarin sijainti on poikkileikkauksessa liitteessä 3/1.

Maarian padosta oli routahavaintoja vain talvelta 1984–85, jolloin routa ulottui 1,5 m syvyyteen eikä padon harjalla ollut koko talvena lunta 0,10 m enempää (liitteet 2/1 ja 4/1).

6.2 Raision tekojärven padot (Haunisten pato)

Raision tekojärven vuonna 1974 valmistuneet padot (pato 1, pato 2 ja pato 3) olivat homogeenisiä moreenipatoja.

Patojen harjan taso oli +32,50 m ja harjan rakennekerrokset olivat seuraavat:
- ylimpänä 0,5 m soraa,
- 0,2 m hiekkaa ja
- patomoreeni, silttinen hiekkamoreeni.

Tekojärven ylin vesipinta oli HW +31.00 m, joten padon kuivavara oli vain 1,5 m.

Roudan syvyyden tarkkailua varten asennettiin syksyllä 1984 routamittarit padon keskilinjalle seuraaviin poikkileikkauksiin

- mittari 1, Pl 1/1+10, kl, harja (pato 1, paalu 1+10, keskilinja)
- mittari 2, Pl 2/1+80, kl, harja

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/1 ja routamittarien sijainti poikkileikkauksissa liitteessä 3/1 .

Roudan syvyyshavaintoja tehtiin kolmena peräkkäisenä talvena 1984 – 85, 1985 – 86 ja 1986 – 87, jotka olivat 1980–luvun ankarimmat talvet (liitteet 4/1 ja 4/2).

Talvina 1984 – 85 ja 1986 – 87 routa tunkeutui padon harjan keskilinjalla 1,55 – 1,85 metrin syvyyteen eli 0,05–0,35 m HW–tason alapuolelle samalla, kun padon harjalla oli lunta 0,30 – 0,40 m (liite 2/1).

6.3 Silvolan tekojärven maapadot

Helsingin kaupunki rakennutti raakaveden laadun parantamiseksi ja vakioimiseksi Silvolan tekojärven, joka valmistui vuonna 1962.

Maapadot olivat vyöhykepatoja, joiden tiivistesydän oli joko laihaa savea tai hiekkamoreenia. Patojen harjan taso oli +44,60 m ja altaan vesipinnan HW +42,00 m, jolloin patojen kuivavaraksi jäi 2,60 m.

Routamittareita asennettiin padon I poikkileikkauksiin Pl 7+40 ja Pl 11+60 padon harjan keskilinjalle sekä harjan kuivalle puolelle ja altaan puolelle.

Poikkileikkauksessa Pl 7+40 padon tiivistesydän oli soraista hiekkamoreenia ja poikkileikkauksessa Pl 11+60 laihaa savea.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla on esitetty liitteessä 1/1.

Routahavaintoja tehtiin talvesta 1982 – 83 talveen 1988 – 89 lukuunottamatta talvea 1987 – 88.

Padon keskilinjan routaputkien kunnossapidossa oli ongelmia ja niinpä savisydänpadosta on havaintoja vain talvelta 1983 – 84 ja moreenisydänpadosta talvilta 1983 – 84, 1984 – 85 ja 1985 – 86.

Patoharjan keskilinjalla suurin mitattu roudan syvyys oli 1,95 m talvella 1984 – 85 poikkileikkauksessa Pl 7+40.

Routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa esitetään liitteessä 3/2.

6.4 Puntarikosken voimalaitospato

Vuonna 1958 Joensuun lähelle valmistuneen Puntarikosken voimalaitoksen säännöstelypatoon liittyvät maapadot olivat vyöhykepatoja, joiden tiivistesydän oli hietaista hiesua ja hietaista moreenia. Tiivistesydämen keskellä oli lisäksi puinen tiivistepontti, jonka yläpää oli tasolla +87,80 m. Padon harjan taso oli +89,30 m ja ylävedenpinnan taso oli +87,50 m, joten kuivavara oli 1,80 m.

Koska padon harjalla kulki yleinen tie, niin jouduttiin routamittari sijoittamaan harjan ylävedenpuoleisen luiskan yläosaan, jossa se oli kokonaan suodatinsorassa.

Padon rakennekerrokset routamittarin kohdalla esitetään liitteessä 1/1 ja routamittarin sijainti patopoikkileikkauksessa liitteessä 3/3.

Routamittari asennettiin patoon keväällä 1985, mutta luotettavia roudan syvyyshavaintoja saatiin vasta talvilta 1986 – 87 ja 1987 – 88 (liite 4/5).

Suurin roudan syvyys 1,46 m mitattiin talvella 1986 – 87. Routamittarin kohdalla oli yleensä lunta 0,3 – 0,9 m koko talven ajan (liite 2/1).

6.5 Kuokkastenkosken maapato

Vuonna 1965 lähelle Nurmesta valmistunut Kuokkastenkosken maapato oli vyöhykepato, jonka tiivistesydän oli moreenia. Padon harjan taso oli +105,50 m ja vedenpinnan HW +103,70 m, joten padon kuivavara oli 1,80 m. Tiivistesydämen yläpinta padon harjan keskilinjalla oli tasolla +104,00 m. Patoharjan altaan puoleisessa reunassa, routamittarin kohdalla oli suodatinsoraa 2,30 metrin syvyyteen.

Padon rakennekerrokset routamittarin kohdalla esitetään liitteessä 1/1 ja routamittarin sijainti patopoikkileikkauksessa liitteessä 3/3.

Routamittari asennettiin patoon keväällä 1985, mutta luotettavia roudan syvyyshavaintoja saatiin vasta talvilta 1986 – 87 ja 1987 – 88 (liite 4/6).

Suurin roudan syvyys 1,55 m mitattiin talvella 1986 – 87 (liite 2/2). Routamittarin kohdalla oli molempina talvina lunta 0,2 – 0,7 m.

6.6 Kuurnan voimalaitospato

Kuurnan voimalaitoksen vuonna 1971 valmistunut Laurinvirran maapato sijaitsi lähellä Joensuuta. Pato oli tyypiltään vyöhykepato, jonka tiivistesydän oli moreenia.

Padon harjan taso oli pääosin +86,00 m ja ylin vesipinta oli HW +84,20 m, joten kuivavara oli vain 1,80 m.

Koska padon harjalla kulki yleinen tie, niin routamittari jouduttiin sijoittamaan harjan ylävedenpuoleiselle reunalle, jossa routamittari oli kokonaan suodatinsorassa. Rakennekerrokset routamittarin kohdalla esitetään liitteessä 1/2 ja routamittarin sijainti patopoikkileikkauksessa liitteessä 3/4.

Routamittari asennettiin keväällä 1985, mutta luotettavia roudan syvyyshavaintoja saatiin vasta talvilta 1986 – 87 ja 1987 – 88 (liite 4/7).

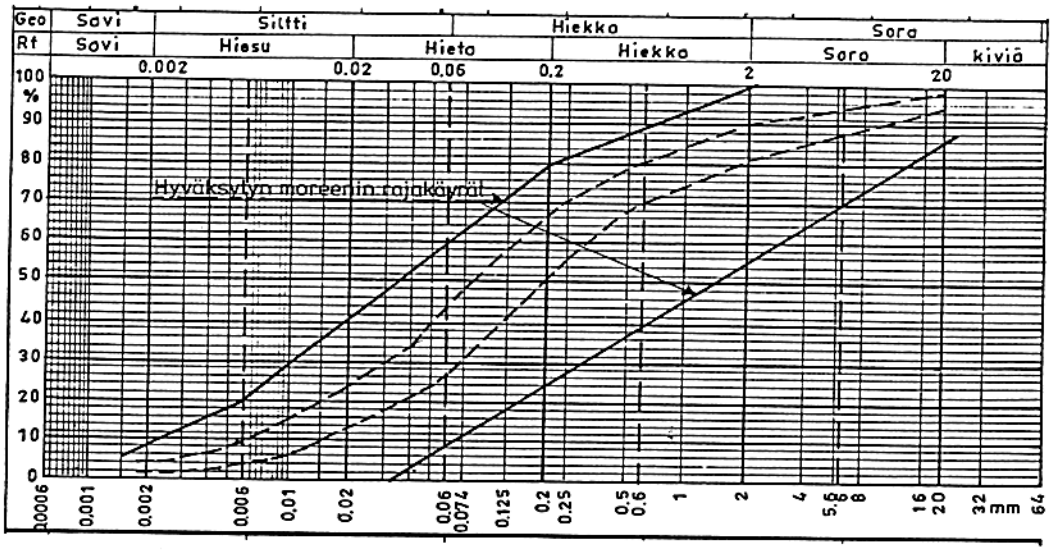
Suurin roudan syvyys 1,13 m mitattiin talvella 1986 – 87, jolloin routamittarin kohdalla oli lunta 0,46 m (liite 2/2). Lumen paksuus oli molempina talvina enimmillään 0,6 – 0,8 m.

6.7 Liikapuron altaan maapato

Vuonna 1966 Jalasjärvelle valmistuneen Liikapuron altaan maapato oli pääasiassa kalliolle tai moreenille perustettu homogeeninen maapato. Suunnitelman mukainen padon harjan leveys oli 3 m ja harjan taso +134,20 m sekä altaan HW–taso +133,00 metriä. Korkeimmilla pato–osilla todellinen harjan korkeus vaihteli + 134,30 – 134,60 m välillä, joten käytännössä padon kuivavara oli 1,20 – 1,60 m.

Padon tiivistesydän oli rakennettu siltti– ja hiekkamoreenista, jonka tiivistys oli suoritettu 0,50 – 1,00 metrin kerroksissa. Tukipenger oli rakennettu samasta materiaalista 0,40 – 0,60 metrin kerroksissa. Kuvassa 34 esitetään hyväksytyn materiaalin rajakäyrät sekä rakennusaikaisten rakeisuusmääritysten tuloksia. Käytettyä materiaalia voitiin rakeisuuden perusteella pitää erittäin routivana.

Padon maksimikorkeus oli noin 7 metriä ja molemmat luiskat oli rakennettu kaltevuuteen 1:1,5. Suojakerroksina oli padon korkeimmilla osilla märän puolen luiskassa 0,50 metrin kiviheitokekerros, jonka alla oli 0,20 – 0,30 metrin vahvuinen sorasuodatin. Matalammilla pato–osuuksilla oli märän puolen luiskassa moreenipenger sellaisenaan. Kuiva luiska oli verhoiltu ohuella humusmaakerroksella ja padon harjalla oli 0,50 metrin suojakerros karkeasta moreenista. Korkeammilla pato–osilla kuivan luiskan alaosaan oli rakennettu 0,50 metrin paksuinen sorasuodatin.



Kuva 34. Liikapuron maapadon moreenivyöhykkeen rakeisuusrajat ja –määritykset.

Syksyllä 1984 korotettiin maapadon harjaa sorakerroksella noin 0,50 metriä, jonka jälkeen maapadon harjan taso oli vähintään +134,70 m. Koska padon harja oli alkuaankin kapea, niin korotuksen yhteydessä jouduttiin patoa leventämään kuivalle puolelle soralla niin paljon, että luiska pysyi aiemmassa kaltevuudessa 1:1,5 ja harjan leveydeksi tuli 3,50 m.

Syksyllä 1979 asennettiin poikkileikkaukseen Pl 12+00 routamittari 1 padon harjan keskilinjalle ja routamittari 2 kuivan luiskan yläosaan. Poikkileikkaukseen Pl 14+20 asennettiin routamittari 3 padon harjan keskilinjalle ja routamittari 4 kuivan luiskan yläosaan. Korotuksen jälkeen harjan taso routamittari 1:n kohdalla oli +134,70 m ja routamittari 3:n kohdalla +134,90 m.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/2 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/4.

Routamittareita havaittiin säännöllisesti talvesta 1979 – 80 lähtien (liitteet 4/8 – 4/13).

Liikapuron padolla oli havaintoaikana aina lunta vähintään 0,20 – 0,30 m padon harjalla, eikä routa ulottunut yleensä HW–tason alapuolelle. Poikkeuksen muodostaa talvi 1984 – 85, jolloin padon korotustyö sattui samanaikaiseksi ankaran talven kanssa ja työn johdosta alkutalven aikana padon harjalta aurattiin lumi pois. Tämän ja padon harjalla tapahtuneen liikennöinnin vaikutuksesta suurin mitattu roudan syvyys oli 2,20

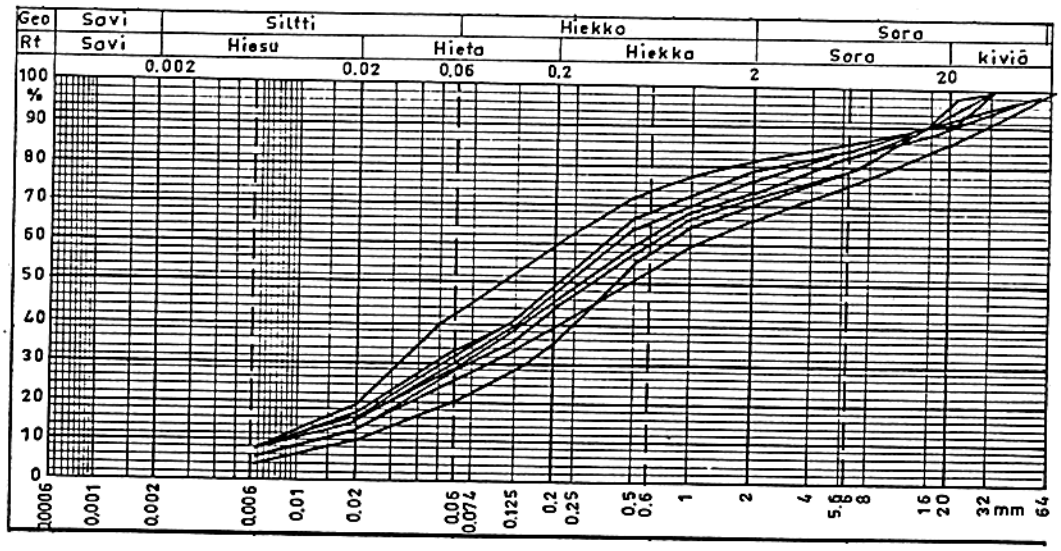
– 2,28 m eli routa ulottui enimmillään yli 0,50 metriä HW–tason alapuolelle, tasolle + 132,42 m (liite 2/2).

6.8 Kivi– ja Levalammen altaan maapato

Kivi– ja Levalammen pato oli rakennettu ensimmäisen kerran 1964, jolloin altaan HW oli +76,37 m. Sen jälkeen pato rakennettiin lähes kokonaan uudestaan samalle paikalle 1976, jolloin altaan HW–tasoa nostettiin noin 2,30 m eli tasolle +78,70 m. Pato oli tiiviille pohjamoreenille tai kalliolle perustettu homogeeninen moreenipato, jonka harjan taso oli +80,40 m. Padon suurin korkeus säännöstelypadon kohdalla oli 6,90 m ja muualla enintään 3,90 m.

Padon harjan leveys oli 4,00 m ja molempien luiskien kaltevuus oli 1:2. Märän puolen luiskan verhouksena oli 0,80 metriä paksu louhoskerros, jossa suurin sallittu lohkarekoko oli 0,60 metriä. Louhoskerroksen alla oli 0,50 metrin vahvuinen sorasuodatin. Padon kuiva luiska oli suojattu ohuella humusmaakerroksella ja harjalla oli 0,25–0,35 metrin suojakerros sorasta. Padon kuivavara oli 1,70 metriä.

Padon tiivistesydän ja tukipenger oli rakennettu moreenista, joka sisälsi hienoainesta (d < 0,074 mm) vähintään 15 % laskettuna 5,6 mm:ä hienommasta aineksesta. Moreenin tiivistystyön tavoitteena oli tiiviysaste D > 90 % ja vedenläpäisevyyskerroin $k < 10^{-6,5}$ m/s. Kuvassa 35 esitetään eräitä rakeisuuskäyriä rakennustyössä käytetystä moreenista. Padon rakentamiseen käytetty moreeni oli rakeisuuden perusteella routivaa.



Kuva 35. Kivi– ja Levalammen maapadon tiivistyssydämen ja tukipenkereen rakeisuusmäärityksiä.

Padon kuivan luiskan alaosaan oli rakennettu vaakasuodatin. Suodatin oli 0,80 metriä paksu ja sen leveys oli 0,7 x kuivan luiskan vaakaleveys. Sorasta tehdyn suodattimen vedenläpäisevyyskertoimen tuli olla $k > 10^{-5,5}$ m/s. Suotovesien poisjohtamiseksi oli suodattimeen asennettu muoviputkisalaoja.

Syksyllä 1979 asennettiin Kivi– ja Levalammen maapatoon kolmeen poikkileikkaukseen routamittareita. Poikkileikkaukseen Pl 8+05 asennettiin routamittari 1 padon

harjan keskilinjalle, routamittari 2 kuivan luiskan yläosaan ja routamittari 3 kuivan luiskan alaosaan.

Poikkileikkaukseen Pl 9+43 asennettiin routamittari 4 padon harjan keskilinjalle ja routamittari 5 kuivan luiskan yläosaan. Poikkileikkaukseen Pl 12+73 asennettiin routamittari 6 padon harjan keskilinjalle ja routamittari 7 kuivan luiskan yläosaan.

Routamittareita havaittiin säännöllisesti talvesta 1979 – 80 lähtien (liitteet 4/14 – 4/25).

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/2 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteissä 3/5.

Syksyllä 1980 laitettiin padon harjalle noin 0,30 m turvetta poikkileikkauksen Pl 12+73 molemmin puolin muutaman kymmenen metrin matkalle. Tarkoituksena oli selvittää turpeen soveltuvuutta patoharjan routasuojaukseen.

Maapadon harjan routasuojausta parannettiin vuonna 1989 paaluvälillä Pl 9+50 – 23+00. Routasuojaus tehtiin asentamalla 60 mm vahvuinen polystyreeni eristelevy FINNFOAM–4 tasatun, kaltevuudessa 0,05 järvelle päin viettävän, sorakerroksen päälle. Eristelevyn päälle levitettiin polyeteenikalvo ja routaeriste suojattiin sorakerroksella. Padon harjan tasoksi tuli +80,70 m, jolloin padon kuivavara kasvoi 2,00 metriin. Moreenitiivisteen yläpinnan taso oli +79,90 m. Uuden säännöstelypadon rakentamisen yhteydessä toteutettiin routasuojaus myös paaluvälillä Pl 3+80 – 9+50.

Kivi– ja Levalammen padolla suurin roudan syvyys 1,81 m mitattiin talvella 1979 –80 poikkileikkauksessa Pl 12+73. Tuolloin routa ulottui 0,16 m HW–tason alapuolelle. Syksyllä 1980 tähän poikkileikkaukseen laitettiin harjalle routaeristeeksi noin 0,30 m turvetta, minkä jälkeen suurin mitattu roudan syvyys tässä poikkileikkauksessa oli 1,10 m talvella 1986 – 87. Muissa poikkileikkauksissa routa ulottui syvimmillään 1,55 metrin syvyyteen eli tasolle +78.90 m (liite 2/3).

Kivi– ja Levalammen padolla oli yleensä padon harjalla jonkin verran lunta ja kuivassa luiskassa runsaasti lunta. Tästä syystä roudan syvyydet olivat pienempiä kuin muissa Seinäjoen ympäristön padoissa.

6.9 Hirvijärven tekojärven maapato

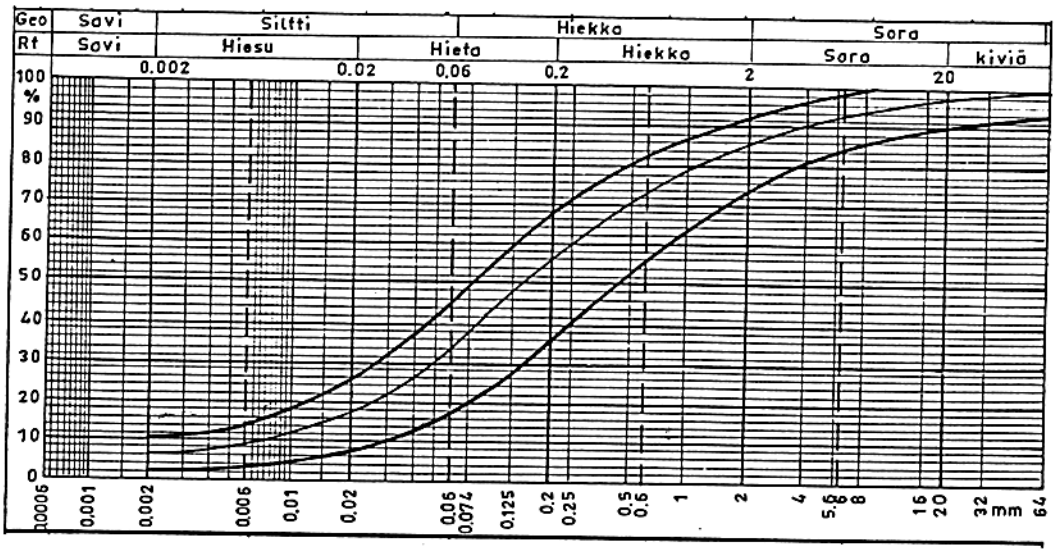
Lapuanjoen järjestelyyn liittyvä Hirvijärven tekojärven maapato oli maksimikorkeudeltaan noin 7,80 metriä korkea homogeeninen moreenipato. Vuonna 1973 valmistunut pato oli perustettu joko moreenipohjalle tai kalliolle lukuunottamatta lyhyehköjä painopenkereellä vahvistettuja pehmeikköosuuksia.

Padon tiivistyssydän ja tukipenger oli rakennettu moreenista, joka sisälsi hienoainesta (d < 0,074 mm) vähintään 15 prosenttia laskettuna raeläpimitaltaan 5,6 mm:ä hienommasta aineksesta. Moreeni oli levitetty ja tiivistetty keskimäärin 0,50 metrin kerroksissa suurimman kivikoon rajoittuessa puoleen kerrospaksuudesta. Moreenin tiivistystavoitteena oli tiiviysaste D > 90 % lukuunottamatta painopenkereen vaativia pehmeikköosuuksia, joissa tiiviysastevaatimus oli D > 85 %. Vedenläpäisevyyskertoimen tuli olla $k < 10^{-6,5}$ m/s. Kuvassa 36 esitetään patoon käytetyn moreenin rakeisuus

keskiarvo- ja raja-arvokäyrinä 350 kokeen perusteella. Rakeisuuden perusteella voitiin patoon käytettyä moreenia pitää routivana.

Hirvijärven maapadolla suoritettiin myös talvirakentamiskokeilu, jossa selvitettiin talviolosuhteiden ja jäätymisen vaikutuksia moreenin ominaisuuksiin maapatoa rakennettaessa (Kalliomäki 1970).

Padon harjan korkeus oli alkuperäisen suunnitelman mukaan +90,70 m. Altaan pitkäaikainen HW oli +88,70 m ja tulva-HW oli +88,95 m. Padon kuivavara oli muulloin 2,00 m, mutta tulva-aikana se saattoi olla 1,75 m.



Kuva 36. Hirvijärven altaan maapadon moreenin rakeisuuden keski- ja raja-arvokäyrät 350 kokeen perusteella.

Padon harjan leveys oli 4,00 m. Harjalla oli suojakerroksena 1,25 metrin paksuinen louhos- ja sorakerros.

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

Patorakenteen kuivatus oli hoidettu padon pohjatasoon rakennetulla vaakasuodattimella. Suodattimen materiaali oli lajittunutta hiekka- tai soramaata, jonka vedenläpäisevyyskertoimen tuli olla $k > 10^{-5,5}$ m/s. Vedenpoistoa varten oli suodattimeen asennettu Ø 100 mm muoviputkisalaoja, jonka ympärystäyttönä oli 0,10 metriä karkeaa soraa.

Syksyllä 1980 asennettiin poikkileikkaukseen Pl 39+00 routamittari 1 padon harjan keskilinjalle, routamittari 2 kuivan luiskan yläosaan ja routamittari 3 kuivan luiskan alaosaan. Routamittareiden välittömään läheisyyteen asennettiin myös lämpötila-anturit 0,05 , 0,10 , 0,20 , 0,50 , 1,00 , 1,50 , 2,00 ja 2,50 metrin syvyyksille.

Syksyllä 1983 asennettiin vielä routamittari 4 lähelle padon harjaa märkään luiskaan ja routamittari 5 vastaavalle tasolle kuivaan luiskaan.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteissä 1/2 ja 1/3 sekä routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksessa liitteessä 3/6.

Routahavaintoja tehtiin talvikausina säännöllisesti talvesta 1980 – 81 lähtien (liitteet 4/26 – 4/31 ja 6/5 – 6/7).

Kesällä 1986 korkeammalla pato–osalla padon harjaa korotettiin murskeella keskimäärin 0,40 m routasuojauksen parantamiseksi. Korotuksen jälkeen padon harjan taso oli vähintään +90,90 m ja kuivavara oli 2,20 m. Harjan korotuksen yhteydessä lämpötila–anturien syvyys kasvoi 0,45 m.

Padon harjalla routa syvimmillään ulottui ennen korotusta talvella 1984 – 85 tasolle +88,68 m eli 2,08 m:n syvyydelle. Korotuksen jälkeen talvella 1986 – 87 routa ulottui lähes samalle tasolle +88,79 m eli 2,31 m:n syvyydelle padon harjalta. Hirvijärven altaan vesipinnan HW–tasohan oli +88,70 m , johon routa melkein ulottui em. talvina

6.10 Varpulan altaan maapato

Maapato oli rakennettu kahdessa eri vaiheessa siten, että ensimmäinen vaihe oli toteutettu vuosina 1960 – 64 ja toisena vaiheena toteutettiin padon korotus vuosina 1973 – 76. Maapato oli alunperin rakennettu harjakorkeuteen +92,50 m ja toisen vaiheen yhteydessä padon harja korotettiin patoa vastaan tulevasta vesipaineesta riippuen tasolle +93,50 – 94,00 m.

Maapato oli korkeimmilta osiltaan vyöhykepato, jossa oli vino tiivistesydän hiekka–moreenista. Tukipenkereessä ja suojavyöhykkeessä oli käytetty samaa materiaalia. Maapadon moreenitiivisteen tiiviysvaatimuksena oli ensimmäisessä rakennusvaiheessa 95 %:n tiiviysaste ja korotusvaiheessa 90 % (parannettu Proctor). Padon tiivistemateriaalin vedenläpäisevyysvaatimuksena oli vedenläpäisevyyskerroin $k < 10^{-6,5}$ m/s. Matalat pato–osat olivat homogeenisiä moreenipatoja.

Vyöhykepadon pohjaa oli tiivistetty ensimmäisessä rakennusvaiheessa puuponttiseinällä ja maainjektoinnilla. Suunnitelman mukaisesti kallion pintaosa oli myös tiivistetty injektoimalla 6 metrin syvyyteen.

Läpäisevien maakerrosten katkaiseminen puupontin ja maainjektoinnin avulla oli todennäköisesti jäänyt vaillinaiseksi ja myös kallion pintaosan epäiltiin olleen vettä läpäisevän. Patoa korotettaessa tiivistemoreeni liitettiin vettä läpäisemättömiin kerroksiin, mutta patopohja jäi ensimmäisen rakennusvaiheen mukaiseen tilaan.

Varpulan altaan ylin vesipinta oli HW +92,00 m , joten pääpadon osalla kuivavara oli 2,0 metriä. Padon suurin korkeus oli 6,40 m.

Padon harjan routasuojausta parannettiin 1987 niillä pato–osilla, joissa vedenpainekorkeus oli yli 2 m. Routasuojaukseen käytettiin 50 mm:n paksuista, jäykkää routaeristyslevyä FINNFOAM FL–3, jolloin vältyttiin korottamasta padon harjan tasoa.

Routaeriste asennettiin paaluväleille Pl 25+20 – 28+40 ja Pl 44+00 – 48+60 noin 0,50 metrin syvyydelle padon harjalta.

Syksyllä 1983 asennettiin Varpulan altaan maapadon harjalle routamittarit poikkileikkauksiin Pl 45+30 ja Pl 46+70.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/3 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/7.

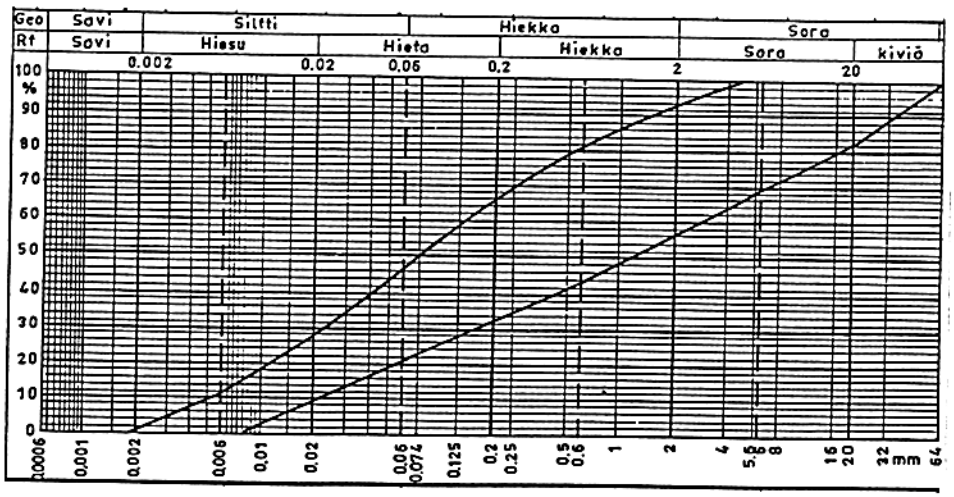
Routahavaintoja padolla suoritettiin talvikaudesta 1983 – 84 lähtien (liitteet 4/32 – 4/35).

Ennen padon harjan routaeristämistä routa ulottui syvimmälle talvella 1986 – 87, jolloin roudan syvyys oli 2,05 – 2,12 m eli padon harja oli jäässä 0,05 – 0,12 m HW-tason alapuolella. Eristämisen jälkeisinä leutoina talvina ei routa tunkeutunut eristelevyjen läpi (liite 2/4).

6.11 Kalajärven tekojärven maapato

Kalajärven maapato oli vuonna 1976 Peräseinäjoelle valmistunut Kyrönjoen järjestelyyn liittyvä homogeeninen maapato, jonka suurin korkeus oli 7,60 m. Pato oli perustettu tiiviin pohjamoreenin tai kallion varaan poistamalla padon alta savi- ja silttikerrostumat.

Padon tiivistesydämen ja tukipenkereen materiaali oli 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 vedenläpäisevyyskerroin oli keskimäärin k= 10^{-7} m/s. Padon moreenimateriaalin rakeisuusalue esitetään kuvassa 37. Moreeni on rakeisuuden perusteella routivaa.



Kuva 37. Kalajärven maapadon moreenirungon rakeisuusrajat.

Suunnitelman mukainen padon harjan leveys oli noin 5 metriä ja harjan taso korkeudella +107,20 – 107,40 m. Koska tekojärven vesipinnan HW oli +105,50 m, niin kuivavara vaihteli 1,70 – 1,90 metrin välillä. Harjan suojaverhouksena oli +0,50 metrin sorakerros.

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

Patorakenteen kuivatus oli hoidettu rakentamalla padon kuivan luiskan alaosaan rakennettu sorasta vaakasuodatin. Suodattimen leveys oli 0,7 kertaa padon takaluiskan leveys vaakatasossa ja paksuus oli 0,80 – 1,00 metriä. Suotovedet johdetaan pois suodattimeen tehdyissä kivi- tai muoviputkisalaojissa. Kivisalaoja oli niillä pato-osuuksilla, jotka oli rakennettu talvikautena. Kivisalaojan rakennusmateriaalina oli käytetty 50 – 200 mm:n kiviä. Muoviputkisalaoja (d = 90 – 100 mm) oli tehty PVC-salaojaputkesta ja putken ympärillä oli vähintään 0,20 metrin vahvuinen sorasuodatin.

Routamittareita asennettiin kesällä 1979 sekä padon harjalle että kuivaan luiskaan poikkileikkauksiin Pl 20+00, Pl 5+48(M) ja Pl 72+00. Routahavaintoja tehtiin talvesta 1979 – 80 lähtien säännöllisesti (liitteet 4/36 – 4/47).

Kesällä 1980 asennettiin poikkileikkaukseen Pl 72+00 routamittareiden välittömään läheisyyteen lämpötila-anturit 0,05 , 0,10 , 0,20 , 0,50 , 1,00 , 1,50 , 2,00 ja 2,50 metrin syvyyksille. Patorakenteen lämpötilat havaittiin yleensä roudan syvyysmittausten yhteydessä kerran kuukaudessa (liitteet 6/8 – 6/10).

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/3 ja routamittareiden ja lämpötila-antureiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/8.

Maapadon routasuojauksen parantamistyö tehtiin marraskuussa 1983. Maapadon harjaa korotettiin soralla paaluväleillä Pl 6+90 – 12+80, Pl 0+00(M) – 10+00(M), Pl 61+00 – 85+40 ja Pl 86+90 – 90+20 0,40 metrillä ja Pl 16+15 – 25+10 0,30 metrillä. Korotetun maapato-osuuden kokonaispituus oli kaikkiaan noin 5 100 m. Korotuksen jälkeen yli 3 m korkeammilla pato-osuuksilla harjan taso oli +107,60 m lukuunottamatta paaluväliä Pl 16+15 – 25+20, jossa se oli +107,50 m. Alle 3 m korkeilla pato-osuuksilla harjan taso oli +106,50 m. Padon kuivavara yli 3 m korkeilla pato-osuuksilla oli 2,00 – 2,10 m ja harjan leveys 4 m. Padon tiivisteosan yläpinnan alin korkeustaso oli +106,20 m.

Ennen padon harjan korotusta routa ulottui poikkileikkauksessa Pl 72+00 kahtena peräkkäisenä talvena 1979 – 80 ja 1980 – 81 hieman HW-tason alapuolelle, tasoille +105,44 m ja +105,41 m. Roudansyvyydet olivat tuolloin 1,96 m ja 1,99 m padon harjalta mitattuna.

Korotuksen jälkeen routa ulottui poikkileikkauksessa Pl 20+00 2,30 m:n syvyyteen eli tasolle +105,30 m talvella 1984 – 85 ja 2,27 m:n syvyyteen eli tasolle +105,33 m talvella 1986 – 87. Muina havaintotalvina routa ei ulottunut HW-tason alapuolelle (liitteet 2/4 ja 2/5).

Maapadon kuivassa luiskassa paalun 72+00 kohdalla havaittiin vuonna 1985 padon pintakerrosten löyhtymistä. Lisäksi luiskassa oleva suotovedenkorkeuden havaintoputki oli hieman kallistunut. Tutkimukset osoittivat löyhtymisen johtuneen roudasta. Routa tunkeutui talvikautena 1984 – 1985 padon kuivassa luiskassa enimmillään noin 1 metrin syvyyteen.

6.12 Kyrkösjärven tekojärven maapato

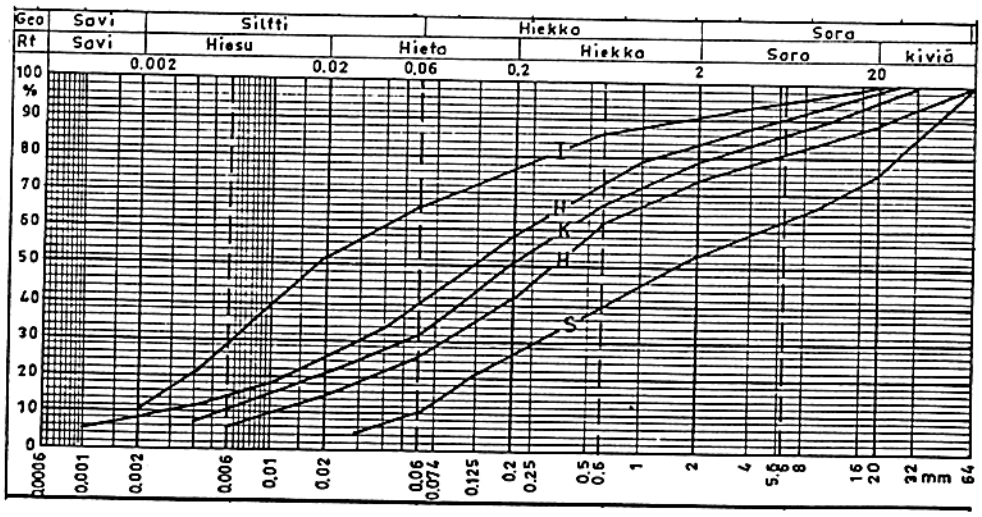
Kyrkösjärven maapato oli Seinäjoelle vuonna 1980 valmistunut homogeeninen maapato, jonka suurin korkeus oli 6,95 m.

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

Tiivistyssydän ja tukipenger oli rakennettu paikalta löytyneistä moreeneista. Moreenin hienoainespitoisuuden tuli olla vähintään 15 % niistä lajitteista, jotka läpäisivät 5,6 mm:n seulan. Kuvassa 38 esitetään maapatotyön valvontarekisterin mukaiset rakeisuuskäyrät moreenirunkoon käytetystä materiaalista. Rakentamisessa käytettyä moreenia voidaan pitää rakeisuuden perusteella routivana. Tiivistystavoitteeksi oli asetettu 90 %:n tiiviysaste ja vedenläpäisevyyskertoimen tuli olla $k < 10^{-6,5}$ m/s.

Suunnitelman mukainen harjan taso oli +82,50 – 82,95 m ja harjan leveys 5,50 metriä. Koska altaan vedenpinnan HW–taso oli +81,25 m, niin jäi kuivavaraksi vain 1,25 – 1,70 m. Padon tiivistemoreenin yläpinnan alin korkeustaso oli +82,25 m.

Luiskat oli rakennettu pääasiassa kaltevuuteen 1:2 ja 1:2,5. Märkä luiska oli suojattu louhoksesta tehdyllä kiviheitokkeella, jonka kerrospaksuus oli 0,70 m suurimman kivikoon ollessa 0,50 m. Matalilla pato–osuuksilla oli käytetty myös luonnonkiviainesta. Kiviheitokkeen alla oli 0,50 m paksu sorasuodatin. Suodattimen tiiviysastevaatimus oli 90 % ja suodatin pyrittiin tiivistämään yhtenä kerroksena. Kuiva luiska verhottiin 0,20 m turve– tai ruokamultakerroksella. Padon harja oli suojattu 0,50 metrin sorakerroksella.



Kuva 38. Kyrkösjärven maapadon moreenirungon rakeisuus.
I = minimi *K = keskiarvo*
S = maksimi *H = keskihajonta*

Patorakenteen kuivatus oli hoidettu rakentamalla padon kuivan luiskan alaosaan sorasta vaakasuodatin, jonka leveys oli 0,7 kertaa kuivan luiskan vaakaleveys. Lisäksi oli rakennettu osalle patoa myös pystysuodatin. Vaakasuodattimeen oli rakennettu rei'itetystä PVC–salaojaputkesta (d = 90 – 100 mm) muoviputkisalaoja, jonka ympärystäyttönä oli 0,15 metrin suodatinkerros.

Syksyllä 1979 asennettiin ensimmäiset routamittarit ja lämpötila–anturit patoon. Keskeneräiseen patoon asennettiin padon keskilinjalle poikkileikkauksiin Pl 37+00 ja Pl 50+00 routamittarit 1 ja 2, jotka poistettiin keväällä 1980 töitä jatkettaessa. Padon poikkileikkaukseen Pl 57+00 asennettiin harjan molempiin reunoihin ja kuivan luiskan puoliväliin routamittarit 3, 4 ja 5 ja lämpötila–anturit 3, 4 ja 5. Lämpötila–anturit asennettiin 0,05 , 0,10 , 0,20 , 0,50 , 1,0 , 1,50 , 2,0 ja 2,5 metrin syvyyksille.

Syksyllä 1981 asennettiin routamittari poikkileikkaukseen Pl 50+75 padon harjan altaan puoleiselle reunalle.

Syksyllä 1983 asennettiin poikkileikkaukseen Pl 57+00 lisää routamittareita, lämpötila–antureita ja 3 routanousumittaria.

Routamittari 7 asennettiin märkään luiskaan, routamittari 8 padon harjan keskilinjalle ja routamittari 9 kuivaan luiskaan.

Routanousumittarit asennettiin padon harjasoran alle moreenin pintaan.

Routamittari 8 kohdalle asennettiin lämpötila–anturit 0,20 , 0,50 , 1,00 , 1,50 , 2,00, 2,50 , 3,00 , 4,00 , 5,00 ja 7,00 metrin syvyyksille, joiden avulla voitiin seurata lämpötiloja patorakenteen sisällä.

Maapadon routasuojausta parannettiin korottamalla patoa lokakuussa 1985 noin 0,50 metrin sorakerroksella. Korotuksen jälkeen harjan leveydeksi jäi vähintään 4,00 metriä. Maapadon harjaa korotettiin paaluvälillä Pl 18+20 – 66+20 0,50 metrillä ja paaluvälillä Pl 8+00 – 10+40 ja Pl 67+00 – 73+20 0,40 metrillä ja kaikkiaan patoa korotettiin 5700 metrin pituudelta. Korotuksen jälkeen yli 3 m korkeammilla pato–osuuksilla padon harjakorkeus oli +83,45 m ja alle 3 m korkeilla pato–osuuksilla +82,75 – 83,55 m patotyypistä riippuen. Padon kuivavara oli yli 3 m korkeilla pato–osilla 2,20 metriä. Padon tiivisteosan alin korkeustaso oli +82,25 m. Padon suurin korkeus on 7,00 m ja korkein kohta oli poikkileikkauksen Pl 57+10 kohdalla.

Padon korotuksen yhteydessä syksyllä 1985 siirrettiin routamittari 3 korotetun patoharjan altaanpuoleiseen reunaan ja samalla termoelementtien 3 ja 8 havain–tosyvyydet muuttuivat korotuksen verran syvemmälle padon harjalta laskettuna. Vertailtaessa eri vuosien havaintoja keskenään, on myös otettava huomioon harjan rakenteen muutos korotuksen yhteydessä.

Seinäjoen turvevoimalan rakentamisen jälkeen asennettiin routamittari 10 (Pl 49+63), routamittari 11 (Pl 49+40) ja routamittari 12 (Pl 49+20).

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteissä 1/3 ja 1/4 ja routamittareiden, lämpötila–antureiden ja routanousumittareiden sijainti patopoikki–leikkauksessa esitetään liitteissä 3/9 – 3/11.

Routahavainnointia tehtiin säännöllisesti syksystä 1979 lähtien tammi–maaliskuussa 1 kerta/kk ja huhti–toukokuussa 2 kertaa/kk (liitteet 4/48 – 4/57, 5/1 – 5/4 ja 6/1 – 6/4). Kyrkösjärven padolla routa ulottui HW–tason +81,25 m alapuolelle talvina 1979 – 80, 1980 – 81 ja 1984 – 85 sekä lähes HW–tasolle talvella 1986 – 87. Routa tunkeutui säännöllisesti syvemmälle poikkileikkauksessa Pl 50+75 kuin toisessa havaintopoikkileikkauksessa Pl 57+00. Talvella 1984 – 85 (ennen korotusta) roudan

tunkeutumissyvyys oli 2,13 m poikkileikkauksessa Pl 50+75, ja se ulottui siten tasolle + 80,82 m eli 0,43 m HW–tason alapuolelle (liite 2/5).

6.13 Säläsjärven maapato

Vuonna 1978 Jurvaan valmistunut Säläsjärven allas liittyi Närpiönjoen järjestelyyn. Maapato oli homogeeninen moreenipato, jonka harjan leveys oli 5,00 m. Märän luiskan kaltevuus oli 1:2,5 ja kuivan luiskan kaltevuus 1:2 .

Märän luiskan verhouksena oli 0,60 m kiveä tai louhosta, jonka alla oli 0,40 m sorasuodatin. Kuivan luiskan verhouksena oli 0,20 m humusmaata, johon oli kylvetty ruoho.

Padon harjalla oli 0,50 m kerros soraa tiivistemoreenin suojarakenteena. Padon harjan taso oli +91,80 m ja altaan vesipinnan HW–taso oli +90,00 m, joten kuivavaraksi jäi 1,80 m. Maapato oli varsin matala, sillä vesisyvyys patoa vastaan oli 1,00 – 1,50 m lukuunottamatta säännöstelyaukon kohtaa.

Routamittari asennettiin joulukuussa 1990 patoharjan keskilinjalle poikkileikkaukseen Pl 2+50 .

Padon rakennekerrokset routamittarin kohdalla esitetään liitteessä 1/4 ja routamittarin sijainti patopoikkileikkauksessa liitteessä 3/11.

Routahavaintoja tehtiin talvesta 1990 – 91 lähtien, jolloin roudan suurin syvyys oli 1,79 m, vaikka talvi oli erittäin leuto (liitteet 2/4 ja 4/60).

6.14 Hipin altaan maapato

Vuonna 1987 Nurmonjokeen valmistui Hipin pato, joka patosi jokiuomaan Hipin altaan. Altaan vesipinnan HW–taso oli +36,00 m ja padon harjan taso oli +37,50 m, joten kuivavara oli vain 1,50 m. Padon harja routaeristettiin 2x50 mm FINNFOAM routaeristelevyillä, jotka olivat noin 0,60 metrin syvyydellä padon harjalta.

Maapato oli tyypiltään homogeeninen moreenipato, jonka harjan leveys oli vähintään 5,50 m ja luiskien kaltevuus 1:2.

Padon harjalle asennettiin syksyllä 1987 yhteensä 3 routamittaria poikkileikkauksiin Pl 0+47 ja Pl 0+62.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/4 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/12.

Routahavaintoja tehtiin talvesta 1987 – 88 lähtien (liitteet 4/58 ja 4/59).

Havaintotalvet olivat leutoja ja vain talvella 1990 – 91 routa ulottui eristelevyn alapintaan, jolloin roudan syvyys oli noin 0,65 – 0,75 m (liite 2/4).