6.15 Hautaperän tekojärven maapato

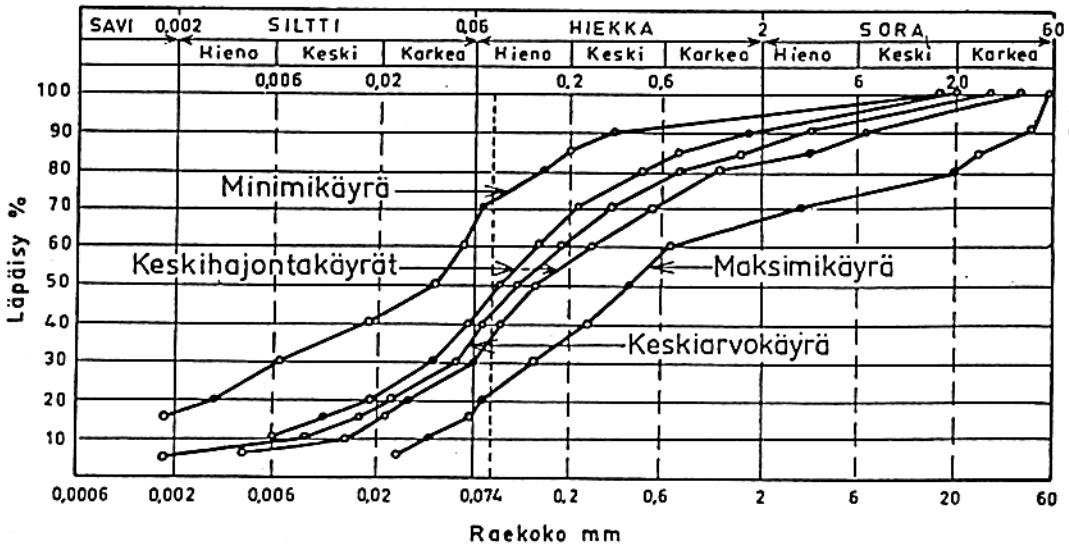
Kalajoen järjestelyyn liittyvän vuonna 1975 valmistuneen Hautaperän tekojärven maapato oli rakenteeltaan moreenirunkoinen homogeeninen maapato, jonka maksimikorkeus oli noin 21 metriä. Voimalaitoksen koneaseman ja ohijuoksutusaukon kohdalla padon korkeus oli 30 m.

Padon harjan korkeus oli alunperin suunniteltu korkeimmilla pato–osuuksilla tasolle +101,40 – 101,60 m . Altaan vedenpinnan HW–korkeus oli +99,50 m ja ns. tulva HW oli +99,75 m. Moreenirungon yläpinta oli tasolla +100,90 – 101,10 m . Padon kuivavara oli alimmillaan 1,90 m .

Patoa oli korotettu 0,30 – 0,50 metriä routasuojauksen parantamiseksi vuosina 1976 – 77, jonka jälkeen kuivavara oli alimmillaan 2,35 m korkeilla pato–osilla.

Pato oli perustettu pääasiassa suoraan maan pinnassa olevan moreenin tai saven kuivakuorikerrostuman varaan. Osalta patolinjaa oli jouduttu poistamaan maan pinnassa olevat turve– ja hietakerrokset, perustamisen tapahtuessa alta paljastuneen moreenin päälle. Koska perustan moreeniaines oli hyvin epähomogeenistä, pyrittiin padon alla tapahtuvaa suotautumista pienentämään tiivistyssydämen upotuksella.

Padon tiivistyssydän ja tukipenger oli rakennettu läheisiltä maanottoalueilta saadusta suhteistuneesta hieta– ja hiekkamoreenista. Kuvassa 39 esitetään Hautaperän maapadon moreenirungon rakeisuuden rajakäyrät. Moreenirunko oli tiivistetty 0,70 – 0,80 metrin kerroksissa tiiviysastevaatimuksen ollessa 90 % talvirajan alapuolella ja 95 % talvirajan yläpuolella. Padon tiivistyssydämen vedenläpäisevyyskertoimen tuli olla $k < 10^{-7}$ m/s ja pohjamaan vedenläpäisevyyskertoimen $k < 10^{-6,5}$ m/s.



Kuva 39. Hautaperän maapadon moreenirungon rakeisuuden rajakäyrät (Körkkö ym. 1983).

Alkuperäisen suunnitelman mukaan padon korkeudesta riippuen harjan leveys oli 3,00 – 6,00 m, mutta toteutunut harjan leveys oli 4,00 – 6,00 m.

Märkä luiska oli rakennettu kaltevuuksilla 1:1,5 , 1:2 , 1:2,25 ja 1:2,5. Kuiva luiska oli puolestaan tehty kaltevuuteen 1:1,5 yläosastaan ja kaltevuuteen 1:2 alaosastaan. Märän luiskan suojausrakenteena oli 0,70 m kiviheitokekerros, jonka alla oli 0,50 m sorasuodatin. Padon korkeimmalla osalla kiviheitokekerroksen paksuus oli 1 m ja sorasuodattimen 0,70 metriä. Kuiva luiska oli suojattu 0,20 m sorakerroksella, lukuunottamatta paaluväliä Pl 7+60 – 9+80, jossa ko. kerros oli 0,30 m. Padon harjan suojauksena oli 0,50 metrin sorakerros.

Patorakenteen kuivatus oli hoidettu rakentamalla padon kuivan luiskan alaosaan vaakasuodatin, jonka paksuus vaihteli 0,50 – 1,50 metriin. Edelleen oli padon korkeimmille osille tasoon +90,00 rakennettu vaakatasoon 0,50 metriä paksu välisuodatin. Suotovesien poisjohtamista varten oli vaakasuodattimeen rakennettu muoviputkisalaoja rei'itetystä PVC–salaojaputkesta (d = 90 – 100 mm) ja osalla patolinjaa oli myös 50 – 200 mm:n kivistä rakennettu kivisalaoja.

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

Sortuman jälkeen roudan syvyyttä padon harjalla mitattiin vuosina 1977 – 80 poikkileikkauksissa Pl 8+00, Pl 10+15 ja Pl 33+00. Suurimmat roudan syvyydet vaihtelivat tuolloin 1,01 – 2,27 metrin välillä.

Routamittareita asennettiin uudelleen padon harjalle poikkileikkauksiin Pl 8+00 ja Pl 33+00 ja niitä havaittiin talvesta 1983 – 84 lähtien säännöllisesti joulu–helmikuussa kaksi kertaa kuukaudessa ja maaliskuusta roudan sulamiseen asti kerran viikossa (liitteet 4/61 – 4/64).

Syvimmälle routa tunkeutui talvella 1986 – 87, jolloin poikkileikkauksessa Pl 8+00 roudan syvyys oli 2,52 m. Routa ulottui tuolloin tasolle +99,33 m eli 0,42 m HW–tason alapuolelle. Myös talvella 1984 – 85 routa ulottui lähes yhtä syvälle eli 2,37 metrin syvyyteen, tasolle +99,48 m. Muina havaintovuosina routa ei ulottunut HW–tason alapuolelle (liite 2/5).

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/4 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/13.

6.16 Patanan altaan maapato

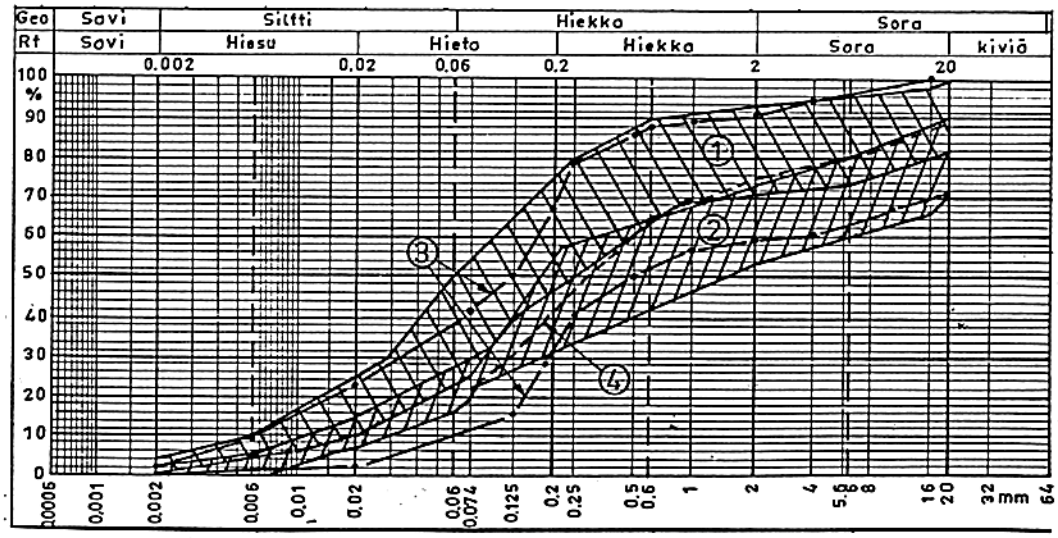
Vetelissä sijaitseva Patanan allas rakennettiin vuosina 1965 – 67. Padon kokonaispituus oli 2800 m. Korkeammalla pato–osalla, paaluvälillä Pl 12+00 – 25+00, suurin rakennekorkeus oli noin 19 metriä. Tämän osan harjan taso oli +125,50 m, harjan leveys 4,00 metriä ja luiskien kaltevuudet 1:2 (lähellä harjaa 1:1,5). Matalien sivupatojen harjan taso oli +124,70 m (osalla +124,50 m), harjan leveys 2,00 metriä ja luiskien kaltevuudet 1:1,5.

Altaan vedenpinnan HW–korkeus oli +123,50 m. Padon kuivavara oli siten pääpadossa 2,00 metriä ja sivupadossa 1,20 (1,00) metriä.

Pato oli rakenteeltaan vyöhykepato. Siinä oli hiekkamoreenista keskeinen tiivistyssydän, jonka molemmilla puolilla oli suodatinvyöhykkeet sorasta. Kuvassa 40 esitetään tiivistesydämeen käytetyn moreenin rakeisuusalueet. Tukipenkereet olivat kivistä soraa, mutta kuivan puolen tukipenkereeseen oli työselityksen mukaan käytetty myös moreenimaita. Altaan puoleiseen luiskaan oli tehty 0,40 metrin verhous välppäkivistä ja kuivan luiskan pintaan 0,30 metrin kerros betonisorasta. Padon harjalla on pääpadossa 0,70 metrin ja sivupadoissa 0,20 metrin sorakerros.

Pohjamaa oli patolinjalla ollut pääasiassa moreenia, jonka päällä oli paikoin ollut lajittuneita karkeampia pintakerroksia. Tiivistyssydän oli yleensä kaivettu läpäisevien pintakerrosten läpi tiiviiseen moreeniin, mutta matalilla sivupadoilla kaivu oli rajoittunut kapeaan tiivistysojaan. Paaluvälillä Pl 15+80 – 20+40 tiivistyssydämen kohdalta oli kaikki irtomaa poistettu ja kallio paljastettu. Säännöstelypato ja padon alitse kulkeva kalliotunneli sijaitsivat patopoikkileikkauksessa Pl 19+70.

Työnaikaisten tarkkailutulosten mukaan padolla tehtyjen vedenläpäisevyyskokeiden vedenläpäisevyyskertoimen keskiarvo oli tiivistemoreenilla k= $10^{-7.22}$ m/s ja keskihajonnan mukainen vaihteluväli k= $10^{-6.75}$ – $10^{-7.69}$ m/s.



Kuva 40. Patanan maapadon tiivistyssydämeen käytetyn moreenin rakeisuusalueet. Eri maanottopaikoilta otetun moreenin rakeisuuden ohjealueet (1, 2), rakeisuusalue, jolla 97 % rakeisuuskäyristä on (3) sekä tyypillinen rakeisuuskäyrä.

Syksyllä 1983 asennettiin padon harjalle routamittarit poikkileikkauksiin Pl 16+46 ja Pl 20+20.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/4 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/13.

Roudan syvyyshavaintoja tehtiin talvesta 1983 – 84 lähtien säännöllisesti (liitteet 4/65 – 4/68).

Talvella 1984 – 85 routa ulottui 2,25 – 2,37 m syvyyteen ja talvella 1986 – 87 2,26 – 2,33 m syvyyteen eli 0,25 – 0,37 m HW–tason alapuolelle (liite 2/6). Matalilla pato–osilla routa ulottui lähes joka talvi HW–tason alapuolelle.

6.17 Venetjoen altaan maapato

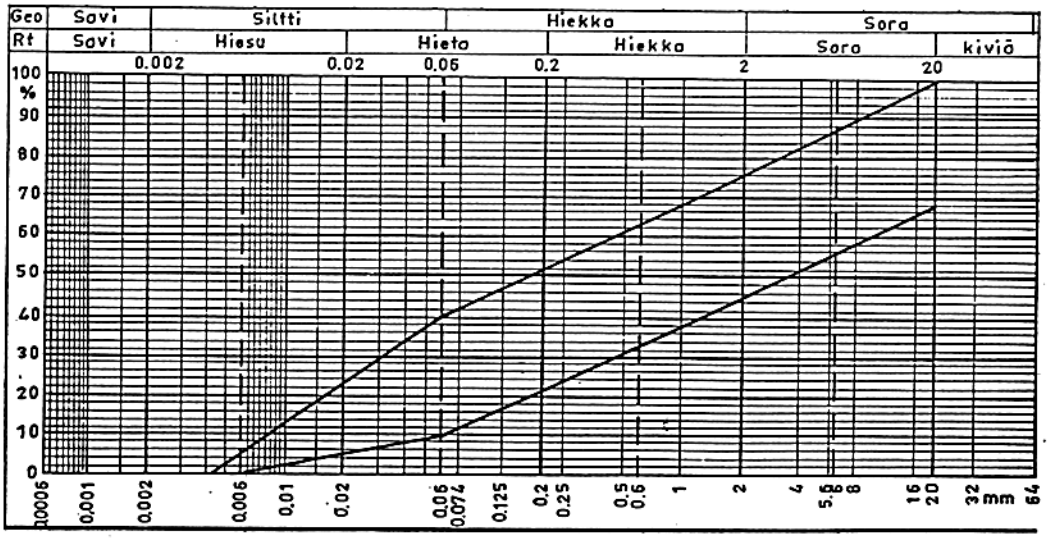
Halsualla sijaitseva Venetjoen allas valmistui vuonna 1966. Venetjoen altaan maapadot olivat homogeenisiä moreenipatoja.

Padon harjan suunniteltu leveys oli 2,00 – 4,00 metriä padon korkeudesta riippuen. Padon harjan korkeustaso oli alkuperäisten suunnitelmien mukaan +134,00 m. Myöhemmin toteutetun routasuojauksen yhteydessä padon harja korotettiin paaluvälillä Pl 13+30 – 25+00 tasolle +134,50 m. Maapadon suurin rakennekorkeus oli 8,50 m ja altaan HW–taso oli +132,50 m.

Padon kuivavara oli routasuojatulla alueella 2,00 metriä ja muualla 1,50 metriä.

Luiskien nykyinen kaltevuus oli märällä ja kuivalla puolella 1:2 padon alku– ja loppupäässä. Paaluvälillä Pl 13+00 – 25+00 kuivan luiskan kaltevuus vaihteli 1:1,5 ja 1:2 välillä. Suunnitelman mukaiset kaltevuudet olivat märällä puolella 1:2,5 ja kuivalla puolella 1:2.

Tiivistesydämeen käytetyn moreenin rakeisuusrajat esitetään kuvassa 41



Kuva 41. Tukipenkereen ja tiivistyssydämen materiaalin rakeisuusalue.

Työselityksen mukaan patoon tiivistetyn moreenin vedenläpäisevyyskertoimen tuli olla $k < 10^{-6} - 10^{-8}$ m/s.

Harjan materiaali oli hiekkamoreenia ja soraa. Märän luiskan verhouksena oli käytetty kiviheitoketta, jonka vahvuus oli 0,40 – 0,70 m padon korkeudesta riippuen. Kuivan luiskan verhoukseen oli käytetty soraa ja turvetta.

Työnaikaisten tarkkailutulosten mukaan moreeninäytteiden rakeisuuden keskiarvokäyrät sopivat pääpiirteissään työselityksessä esitetyn moreenin ihannealueen sisään.

Padon työselityksen valvontaohjeissa esitettiin patomateriaalien tiiveysvaatimukseksi D ≥ 95 % (parannettu Proctor). Käytännössä kuitenkin vaaditun tiiveyden saavuttaminen osoittautui vaikeaksi, paikoin jopa mahdottomaksi. Työn aikana tiiviysvaatimuksia muutettiin niin, että moreenille uudet tiiviysasteen minimiarvot olivat D ≥ 90 % (jokaisessa koepisteessä).

Vedenläpäisevyyskokeita oli tehty sekä ennakkoon maanottopaikoilla että patoon tiivistetystä materiaalista. Lisäksi patolinjalla oli tutkittu padon pohjan vedenläpäisevyyttä. Tuloksista oli kuitenkin säilynyt vain pieni osa. Padolla määritettyjen moreenin vedenläpäisevyyskertoimien keskiarvo oli k= $10^{-7.82}$ m/s. Tulosten perusteella materiaaleille asetetut vaatimukset olivat täyttyneet. Kokonaiskuvan saamista tosin vaikeutti tulosten vähyys. Nykyisiin vaatimuksiin nähden vedenläpäisevyyskertoimien arvot olivat riittävän pienet.

Venetjoen padolle asennettiin vuonna 1983 yhteensä 4 routamittaria kahteen eri poikkileikkaukseen. Padon harjan keskilinjalle asennettiin routamittarit poikkileikkauksiin Pl 21+50 ja Pl 23+80 sekä padon harjan altaan puolelle ja kuivalle puolelle routamittarit poikkileikkaukseen Pl 23+80. Vuonna 1987 asennettiin vielä routamittarit harjan altaan puolelle ja kuivalle puolelle poikkileikkaukseen Pl 15+00.

Syksyllä 1984 toteutettiin padon harjan routasuojaus korottamalla soralla padon harja vähintään tasolle +134,50 m paaluvälillä Pl 13+30 – Pl 25+00. Toteutunut harjan taso oli pääosin + 134,65 m, joten kuivavaran suuruudeksi tuli 2,15 m.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/5 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/14.

Roudan syvyyshavaintoja tehtiin säännöllisesti talvesta 1983 – 84 lähtien (liitteet 4/69 – 4/72).

Padon routasuojausta edeltävänä talvena 1983–84 routa ulottui poikkileikkauksessa Pl 21+50 HW–tason alapuolelle 0,34 m eli harjalta 1,84 metrin syvyyteen. Talvella 1984–85 roudan syvyys padon harjan keskilinjalla oli 2,24 – 2,47 m . Talvella 1986–87 routa ulottui 2,20 – 2,26 metrin syvyyteen (liite 2/6).

Routahavaintojen perusteella voitiin todeta, että routa ulottui kovimpina pakkastalvina maksimissaan lähes 0,50 m HW–tason alapuolelle . Routasuojauksen parantaminenkaan korottamalla soralla padon harjaa ei pystynyt estämään roudan tunkeutumista patorunkoon. Matalammilla pato–osuuksilla routa ulottunee säännönmukaisesti HW–tason alapuolelle.

Venetjoen maapadossa havaittiin keväisin padon pituussuuntaisia halkeamia. Halkeamat sijaitsivat useimmiten padonharjalla lähellä kuivan luiskan reunaa. Paikoitellen halkeamia oli myös lähellä märän luiskan reunaa ja joissakin tapauksissa keskellä patoa. Useiden vuosien ajalta koottujen havaintojen perusteella halkeamat esiintyivät useimmiten samoilla paikoilla. Tyypilliset esiintymispaikat sijaitsivat paaluväleillä Pl 13+00 – 14+20, Pl 14+40 – 17+50, Pl 22+80 – 23+40 ja Pl 23+60 – 24+10.

Halkeamat johtuivat todennäköisesti moreenin routimisesta, koska painumien osuutta halkeamisen syntyyn pidettiin epävarmana. Halkeamien ulottuvuutta syvyyssuunnassa ei pystytty mittaamaan. Vuonna 1984 tapahtuneen routasuojauksen parantamisen jälkeen halkeamien määrän havaittiin vähenneen selvästi seuraavana vuonna (lähinnä

paaluvälillä Pl 17+00 – 21+50), mutta vuoden 1986 keväällä halkeamia oli taas runsaasti.

6.18 Kaitforsin maapato

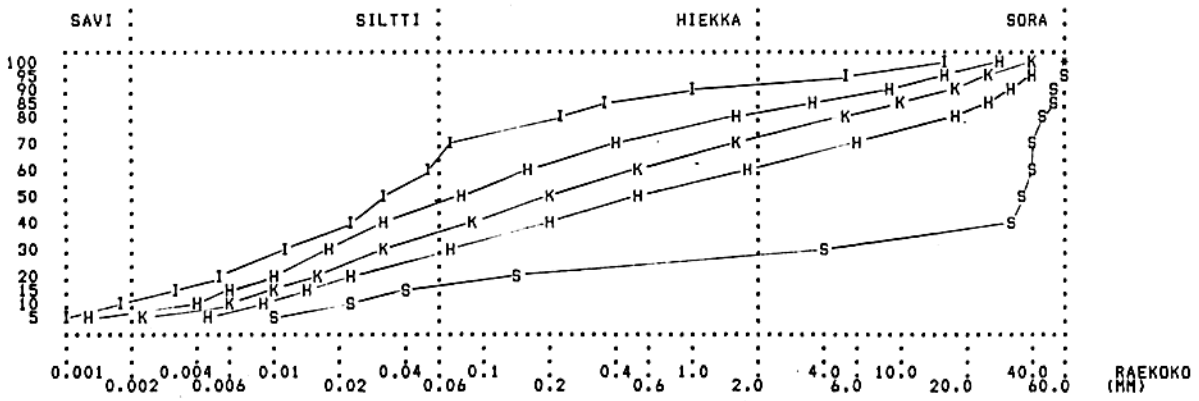
Perhonjoen järviryhmän säännöstelyhankkeeseen liittyvä Kaitforsin pato rakennettiin vuosina 1981 – 83.

Padon kokonaispituus oli noin 2800 m ja harjan taso oli +46,00 m. Harjan leveys oli 5,00 metriä ja luiskien kaltevuudet ovat 1:2. Altaan ylin vesipinta oli tasolla HW +44,00 m,joten padon kuivavara oli 2,00 metriä .

Pato oli rakenteeltaan homogeeninen moreenipato, jonka kuivan luiskan alla oli vaakasuodatin sorasta. Altaan puoleisessa luiskassa oli louhosverhous, jonka alla oli suodatinsorakerros. Harjalla oli moreenin päällä 0,50 metrin sorakerros. Kuivasta luiskasta oli jätetty rakennustyön aikana pois suunnitelmaan sisältynyt humusverhous, mutta se toteutettiin myöhemmin.

Patolinjalla oli työn aikana esiin tulleita paikallisia lajittuneita ja huuhtoutuneita pintakerroksia ja niiden alla pääosin moreenia. Kallio oli pituusleikkauksen mukaan lähellä maanpintaa säännöstelypato II:n läheisyydessä, joten pato voitiin perustaa kalliolle. Sääkskosken säännöstelypato ja koneaseman oli perustettu myös kalliolle. Padon lopullinen pohjataso oli valvontaohjeen mukaisesti määritetty rakennustyön yhteydessä tehdyillä kairauksilla ja koekuopilla. Patorungon alle ei saanut jäädä painuvia tai läpäiseviä kerroksia. Koneaseman oikealla puolella oli patolinjalla todettu rapautunutta kalliota noin 5 metrin paksuinen kerros, joka oli poistettu myös jonkin matkaa koneaseman sivulta. Padon pohja oli tehty tässä kohdassa erikoisrakenteena. Myös paaluvälillä Pl 17+20 –18+00 pohjassa oli rikkonaista kalliota.

Patomoreeni oli rakeisuudeltaan silttistä hiekkamoreenia, jonka hienoainespitoisuus oli varsin suuri. Työnaikaisten tarkkailutulosten mukaiset moreenin rakeisuuksien raja-käyrät esitetään kuvassa 42.



Kuva 42. Kaitforsin maapadon moreenirungon rakeisuuksien rajakäyrät.
I= minimi *K= keskiarvo*
S= maksimi *H= keskihajonta*

Padolla määritettyjen moreenin vedenläpäisevyyskertoimien keskiarvo oli k= $10^{-7.74}$ m/s ja keskihajonnan suuruinen vaihteluväli k= $10^{-7.45}$ – $10^{-8.03}$ m/s.

Kaitforsin maapatoon asennettiin syksyllä 1981 ensimmäiset routamittarit padon keskilinjalle poikkileikkauksiin Pl 5+60, Pl 13+50, Pl 16+80 ja Pl 17+20. Tarkoituksena oli määrittää roudansyvyys keskeneräisillä pato–osilla talvella 1981 – 82. Poikkileikkauksessa Pl 5+60 moreenin yläpinta oli tasolla +45,50 m eli harjalta puuttui vain 0,50 metrin sorakerros. Muissa em. poikkileikkauksissa moreenin yläpinta oli tasoilla + 42,50 – 44,00 m eli syksyllä 1981 pato oli saatu valmiiksi korkeintaan HW–tasolle. Aikaisempien kokemusten perusteella ennen patotyön jatkamista seuraavana kesänä oli varmistuttava siitä, että talven aikana jäätynyt patomoreeni on täysin sula. Löyhtynyt pintamoreeni oli poistettava ja tarvittaessa moreenin pintakerros oli lisätiivistettävä ennen työn jatkamista. Talvella 1981 – 82 suurin mitattu roudansyvyys oli 1,06 m keskeneräisessä padossa.

Lukuunottamatta viimeistelytöitä pato valmistui kesällä 1982, joten syksyllä 1983 asennettiin valmiiseen patoon tarkkailua varten routamittareita useisiin poikkileikkauksiin. Osa routamittareista asennettiin varsinaisille maapato–osuuksille ja osa maapadon ja säännöstelypadon liittymäkohtaan. Poikkileikkauksiin Pl 5+60 ja Pl 13+60 asennettiin routamittarit padon keskilinjalle ja kuivaan luiskaan.

Säännöstelypato II:n ja maapadon liittymäkohtaan asennettiin padon keskilinjan altaan puolelle poikkileikkaukseen Pl 16+94 routamittari 5 0,50 metrin etäisyydelle sekä säännöstelypadon betoniseinästä että betonirakenteisesta tiivisteseinästä. Routamittari 6 asennettiin poikkileikkaukseen Pl 16+96 samaan linjaan, tiivisteseinän ulkopuolelle, 2 metrin etäisyydelle edellisestä mittarista. Routamittari 7 asennettiin poikkileikkaukseen Pl 17+03 padon keskilinjalle, 7 metrin etäisyydelle toisesta mittarista (liite 3/16).

Sääkskosken säännöstelypadon ja maapadon liittymäkohtaan asennettiin routamittarit 8 ja 9 poikkileikkauksiin Pl 24+60 ja Pl 24+62 padon harjan altaan puoleiseen reunaan sekä routamittari 10 padon keskilinjalle poikkileikkaukseen Pl 24+69 (liite 3/17).

Yleensä säännöstelypatojen luukut rakennetaan maapadon keskilinjan alavirran puolelle, jolloin altaassa oleva vesi toimii eristeenä estäen maapadon tiivisteosan haitallisen routimisen. Routiminen löyhentää maapadon tiivisteosaa säännöstelypadon läheisyydessä ja lisää tiivisteosan vedenläpäisevyyttä, josta voi ajanoloon olla seurauksena sisäisen eroosion aiheuttama sortuma.

Koska säännöstelypato II:n luukut oli suunniteltu padon keskilinjan altaan puolelle, jäi maapato alttiiksi säännöstelypadon betonirakenteiden läpi etenevälle roudalle koko rakennekorkeudeltaan.Tämä pyrittiin ainakin osittain estämään rakentamalla syksyllä 1982 betoniseinän ulkopintaan, tulva–aukon puolelle, 50 mm:n paksuinen lämpöeriste polyuretaanista (liite 3/16).

Betonirakenne liitetään maapatoon yleensä padon keskilinjalle rakennetun betoni– tai teräsponttiseinän avulla. Routahavainnoilla oli tarkoitus saada lisätietoa myös tiivisteseinän pituuden suunnitteluperusteisiin.

Roudan syvyyshavaintoja tehtiin talvesta 1983 – 84 lähtien säännöllisesti lukuunottamatta talvia 1985 – 86, 1988 – 89 ja 1989 – 90 (liitteet 4/73 – 4/79).

Suurimmat roudan syvyydet poikkileikkauksissa Pl 5+60 ja Pl 13+60 padon keskilinjalla mitattiin talvina 1984 – 85 ja 1986 – 87. Roudansyvyydet olivat 2,34 – 2,69 m eli routa ulottui 0,34 – 0,69 m HW–tason alapuolelle (liite 2/6).

Lähinnä säännöstelypatoa II mitattu suurin roudansyvyys oli em. talvina yli 3,00 metriä ja 2,5 metrin etäisyydellä säännöstelypadon seinästä talvella 1984 – 85 myös yli 3,00 metriä . Samoina talvina oli padon keskilinjalla, 9,5 metrin etäisyydellä säännöstelypadon seinästä, roudan syvyys 2,18 – 2,22 m. Myös talvina 1983 – 84, 1987 –88 ja 1990 – 91 routa ulottui 0,5 metrin etäisyydellä säännöstelypadon seinästä HW–tason alapuolelle 0,03 – 0,36 m ja routa tunkeutui tukimuurin läpi helpommin kuin luiskasta tai harjalta (routamittari 5).

Sääkskosken säännöstelypadon roudan syvyydet 0,50 metrin etäisyydellä seinästä olivat talvina 1984 – 85 ja 1986 – 87 myös yli 3,00 m, mutta jo 2,5 metrin etäisyydellä seinästä roudan syvyys oli 2,40 – 2,54 m eli sama kuin 9,5 metrin etäisyydellä padon seinästä. Routa siis ulottui 0,40 – 0,54 m HW–tason alapuolelle. Säännöstelypato oli liitetty maapatoon ilman erillistä tiivisteseinää.

Roudan syvyydet säännöstelypato II:n lähellä olisivat ilman lisäeristystä olleet huomattavasti suurempia ja routa olisi myös kauempana säännöstelypadosta ulottunut syvemmälle. Säännöstelypato I:n tulvaluukut ovat selvästi maapadon keskilinjan kuivalla puolella, jolloin altaan vesi estää maapatoa jäätymästä liittymäkohdassa. Lisäksi voidaan todeta, että myös betonista tiivisteseinää pitkin johtuu lämpöä maapadosta.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/5 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteissä 3/15 – 3/17.

6.19 Uljuan tekojärven maapadot

6.19.1 Tulisaaren maapato

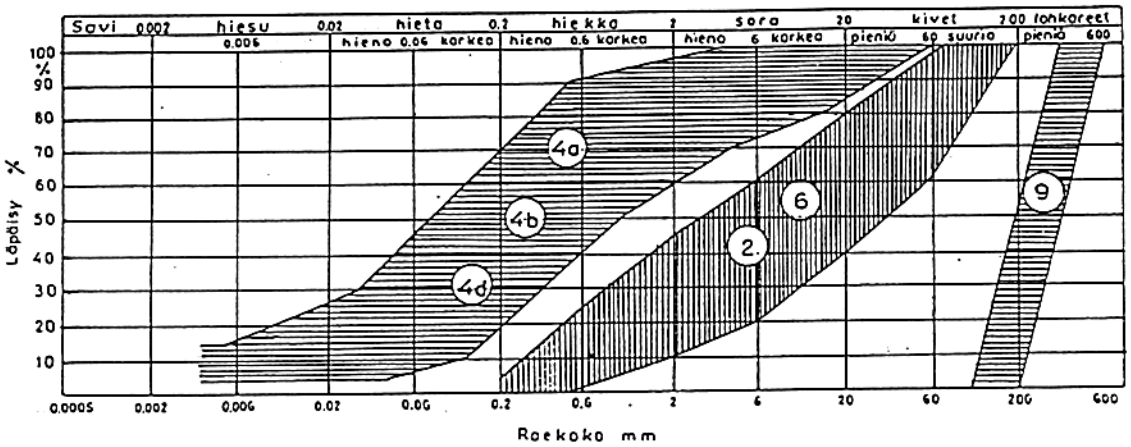
Siikajoen säännöstelyyn liittyvän, vuonna 1970 valmistuneen, Uljuan altaan patoavat yhdessä Tulisaaren maapato ja Arkkusaaren maapato. Tulisaaren maapadosta oli osa rakennettu vyöhykepatona, jonka tiivistesydän oli moreenia ja tukiosat louhetta ja osa homogeenisenä moreenipatona. Vyöhykepadon suurin korkeus oli 9,30 m ja homogeenisen padon 5,10 m.

Padon harjaleveys oli 5,00 metriä, mikä mahdollisti padon kunnossapitoajoneuvojen esteettömän kulun. Luiskan kaltevuus oli homogeenisessä moreenipadossa kuivalla puolella kaikissa tyypeissä 1:2 ja louhepadossa 1:1.5. Altaan puoleisen luiskan kaltevuus oli moreenipadossa 1:2, paitsi tyypissä III 1:2.5. Louhepadossa märän luiskan kaltevuus on 1:1.75.

Toteutettu padon harjan korkeus vaihteli välillä +81,05 – 81,30 m ja moreenisydämen korkeus välillä +79,60 – 80,35 m. Uljuan tekojärven vesipinnan HW–taso oli + 79,00 m. Padon toteutunut kuivavara oli siten 2,05 – 2,30 metriä. Pato oli perustettu kaikilta osiltaan tiiviille ja kantavalle maapohjalle tai tarpeen vaatiessa slammatulle ja injektoidulle kalliolle. Kallio–osuudet oli injektoitu padon keskilinjalta 3 metrin reikävälein ja 6 metrin syvyydeltä.

Tiivistesydän oli rakennettu kuvassa 35 esitetyn rakeisuusalueen mukaisesta moreenista. Tiivistystyön tavoitteena oli ollut tiiviysaste D > 95 % ja vedenläpäisevyyskerroin k < $10^{-6,5}$ m/s. Materiaalin hienoainespitoisuuden tuli olla > 15 % laskettuna 5,6 mm:n seulan läpäisseestä aineksesta. Maksimiraekoko oli saanut olla enintään puolet tiivistettävän kerroksen paksuudesta.

Vyöhykepadon tiivistesydämen molemmille puolille oli tehty 3 metriä paksut sorasuodattimet (liite 3/18). Sorasuodattimen tiiveysvaatimus oli ollut D > 90 %. Tukipenkereen materiaali oli louhosta, jonka rakeisuuden alaraja oli kuvan 43 alueen 9 yläraja. Louhoksen suurin sallittu kivikoko oli 1 m. Louhospenkereelle ei ollut asetettu tiiveysvaatimusta, vaan vaatimuksena oli telakosketusten tietty vähimmäismäärä.



Kuva 43. Tulisaaren maapatojen rakennusmateriaalien rakeisuusalueiden ohjearvoja.
4 Tiivistesydämen moreeni
2 ,6 Sorasuodattimet
9 Matalampien pato-osuuksien märän luiskan kiviheitokekerros.

Homogeenisen padon mitat ja suodatinkriteerit noudattivat Arkkusaaren padon suunnitelmia ja vaatimuksia.

Heti ensimmäisen vedennoston jälkeen oli vyöhykepatoa jouduttu korottamaan kesällä 1970. Tulisaaren padolla paalulla noin 5+30/2 oli havaittu äkillinen paikallinen vuoto noin 1 kk järven ensimmäisen täytön jälkeen. Vuodon syiksi oli arvioitu joko tiivistesydämen harjaosan jäätyminen tai todennäköisimmin rakeisuudeltaan läpäisevä tai löyhärakenteiseksi jäänyt maakerros tiivistesydämen alla.

Tulisaaren vyöhykepadon routasuojausta oli parannettu 9.6.1970 esitetyn täydennyssuunnitelman perusteella. Padon harjan korkeutta oli nostettu soralla ja hiekalla tasoon +81,80 m, jolloin vyöhykepadon kuivavaraksi tuli 2,80 m. Korotuksen jälkeen roudan syvyyttä padon harjalla oli mitattu vuosina 1971 – 73, jona aikana roudan maksimisyvyys oli ollut 2,50 – 2,70 m.

Syksyllä 1983 asennettiin routamittari vyöhykepadon keskilinjalle poikkileikkaukseen Pl 5+00/2, jossa padon harjan taso oli vuonna 1983 suoritetussa mittauksessa

+81,97 m. Myös homogeeniselle pato–osalle asennettiin routamittarit padon harjan keskilinjalle ja harjan kuivalle puolelle poikkileikkaukseen Pl 22+50/1, jonka harjan tarkistettu taso oli +81,30 m. Routamittareita havaittiin säännöllisesti talvesta 1983 – 84 lähtien (liitteet 4/80 – 4/83).

Talvina 1984 – 85, 1986 – 87 ja 1990 – 91 Tulisaaren padoilla mitattiin suurimmat roudan syvyydet. Vyöhykepadossa suurimmat roudansyvyydet olivat em. talvina 2,66 m, 2,53 m ja 2,25 m ja homogeenisessä padossa 2,23 m, 2,26 m ja 2,34 m.

Talvella 1990 – 91 vain homogeenisessä padossa routa ulottui HW–tason alapuolelle. Samana talvena Arkkusaaren padossa suurin mitattu roudan syvyys oli vain 1,57 m, mikä osoittaa, että saman altaan padoilla lumen kinostumisesta riippuen roudan syvyyksissä voi olla melkoisia eroja.

Talvi 1990 – 91 oli poikkeuksellinen Uljuan altaan käytössä, koska keväällä 1990 sattuneen Tulisaaren patovuodon korjaustöiden vuoksi altaan vesipinta oli kevääseen 1991 asti tasolla + 75,00 eikä sitä keväälläkään saanut vielä nostaa tasoa + 78,00 ylemmäksi. Patorakenteen kuivuminen normaalia enemmän ja alemmalla altaan vesipinnalla oli vaikutus roudan syvyyksiin ko. leutona talvena, jonka pakkasmäärä oli $F \approx F_2$.

Padon rakennekerrokset esitetään liitteessä 1/5 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/18.

6.19.2 Arkkusaaren maapato

Arkkusaaren maapato oli tyypiltään homogeeninen moreenipato, jonka suurin korkeus oli 5,20 m. Uljuan tekojärven vesipinnan HW–taso oli +79,00 m. Rakennussuunnitelman mukaisesti patolinjalta oli poistettu kaikki painuvat kerrokset tiiviiseen moreenipintaan saakka.

Padon harjaleveys oli 5,00 m, mikä täyttää padoille asetetut tekniset vaatimukset. Padon harjan korkeus vaihteli välillä +81,05 – 81,25 m ja moreenisydämen korkeus välillä +80,25 – 80,45 m. Padon kuivavara oli pääosalla patoa 2,20 – 2,30 metriä. Kuivavara oli siten pienempi kuin arvioitu roudan maksimisyvyys, mutta selvästi suurempi kuin laskettu HW:n aikainen suurin aallonkorkeus 1,40 m.

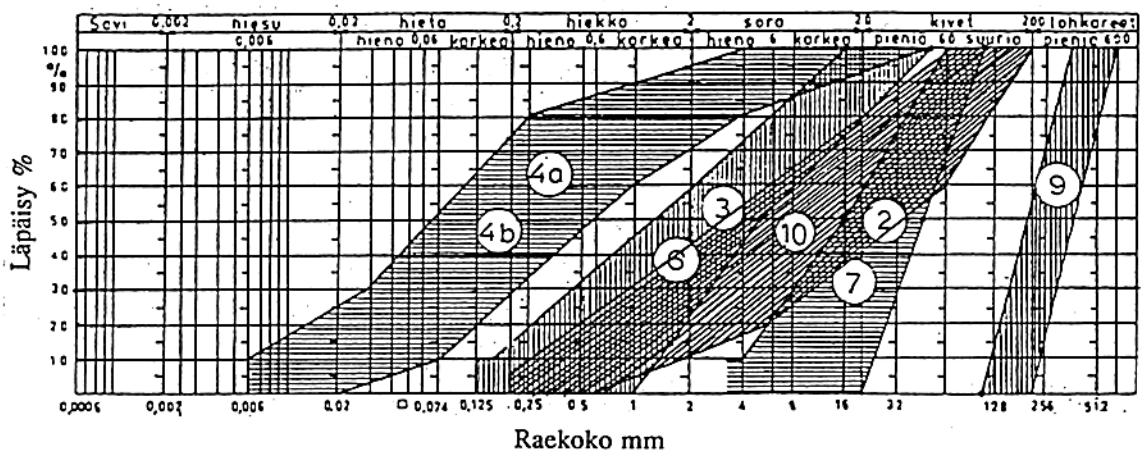
Luiskien kaltevuus oli sekä kuivalla puolella että märällä puolella HW–tason yläpuolella 1:2 ja märällä puolella HW–tason alapuolella 1:2.5. Matalilla pato–osilla märän puolen luiskat olivat kokonaisuudessaan kaltevuudessa 1:2.

Padon harjan suojakerroksena oli 0,80 metriä soraa. Kuivan luiskan verhouksena oli 0,30 m paksu sorakerros. Märkä luiska oli verhottu 0,70 m paksuisella kiviheitokkeella. Kiviheitokkeen alla oli 0,30 m + 0,30 m paksuiset suodatinkerrokset.

Kuvassa 44 esitetään Arkkusaaren padon rakennusmateriaalien rakeisuusalueiden ohjearvoja.

Patoon tiivistetyn moreenin hienoainespitoisuuden vähimmäisvaatimuksena oli ollut 15 % laskettuna 5,6 mm:n seulan läpäisseestä aineksesta. Maksimiraekoko oli saanut olla enintään puolet tiivistettävän kerroksen paksuudesta.

Tiivistesydämen osalta tiiveysvaatimuksena oli ollut Arkkusaaren padoilla ≥ 90 % (parannettu Proctor). Pohjan ja kuivan luiskan suodattimien osalta vaatimus oli ollut ≥ 90 % kaikilla pato-osuuksilla. Märän luiskan soraverhouksella ja kiviheitokkeella ei tiiveysvaatimuksia oltu asetettu, vaan ainoastaan annettu määräsuuruisen puskutraktorin telakosketusten lukumäärä.



Kuva 44. Maapatojen rakennusmateriaalien rakeisuusalueiden ohjearvoja.
4. Tiivistesydämen moreeni, moreenirunko
2,3,6,7,10. Sorasuodattimet
9. Märän luiskan kiviheitokekerros.

Padon pohjamaan sekä patoon tiivistetyn moreenin vedenläpäisevyyskertoimen tuli olla $k \leq 10^{-6,5}$ m/s.

Arkkusaaren maapadon poikkileikkaukseen Pl 7+90/4 asennettiin syksyllä 1983 routamittarit padon harjan keskilinjalle ja harjan kuivalle puolelle. Poikkileikkauksen tarkistettu harjan taso oli +81,40 m. Roudan syvyyksiä mitattiin säännöllisesti talvesta 1983 – 84 lähtien (liitteet 4/80 – 4/84).

Arkkusaaren padolla suoritettujen routamittausten perusteella todettiin roudan syvyyden olleen talvella 1984 – 85 maksimissaan 2,29 m ja talvella 1986 – 87 2,04 m. Koska maapadon kuivavara on pääosin 2,20 – 2,30 metriä , niin routa osassa patoa ulottui syvimmillään HW-tason alapuolelle (liite 2/7).

Talvella 1990 – 91 oli Arkkusaaren padon roudan maksimisyvyys vain 1,57 metriä, kun samanaikaisesti Tulisaaren homogeenisen padon roudan syvyys oli 2,34 m. Suurin vaikutus eroihin roudan syvyydessä oli varmasti sillä, että Arkkusaaren padon päälle kerääntyi helpommin lunta suojaisan sijainnin vuoksi myös padon harjalle

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/5 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksessa liitteessä 3/18.

6.20 Petäjäskosken voimalaitospadot

Kemijokeen Petäjäskosken voimalaitoksen yläaltaan patoamiseksi rakennetut kymmenen maapatoa olivat valmistuneet vuonna 1957. Patojen päätyyppi oli vyöhykepato, jossa oli keskeinen moreenisydän. Yläaltaan HW–taso oli +62,50 m. Maapatojen toteutettu harjan taso pääosalla patoja oli +64,70 m, joten patojen kuivavara oli noin 2,20 m.

Osalla Petäjäskosken maapadoista oli esiintynyt vuosittain pituussuuntaisia halkeamia maapadon keskilinjalla. Halkeamien leveys oli ollut 30–50 mm ja syvyys 0,50 m.

Kesällä 1982 Kemijoki Oy asensi Muurolan maapato 8:aan noin 100 metriä pitkälle pato–osalle harjan eristeeksi 2x100 mm paksuiset styrox–routalevyt.

Roudan syvyyksiä mitattiin sekä eristetyllä että eristämättömällä osuudella ainakin talvina 1982 – 83 ja 1984 – 85 (liite 4/84).

Maapato 8:n harjaosan rakennekerrokset olivat seuraavat:

- eristämättömällä osalla oli ylinnä 1,2 m soraa, jonka alapuolella alkoi tiivistemoreeni,
- eristetyllä osalla oli pinnasta lukien 0,50 m soraa, 2x100 mm styrox–levy, 0,50 – 0,80 m soraa ja tiivistemoreeni.

Talvella 1982 – 83 eristämättömällä pato–osalla suurin roudan syvyys oli 2,37 – 2,44 metriä ja eristetyllä osalla 1,01 – 1,17 m. Talvella 1984 – 85 suurimmat roudan syvyydet olivat vastaavasti 2,75 – 2,80 m ja 1,32 – 1,46 m (liite 2/7).

Molempina talvina routa ulottui eristämättömällä pato–osalla HW–tason alapuolelle, kun taas eristetyllä pato–osalla roudan maksimisyvyys oli noin 1,5 metriä ja routa ulottui enimmillään noin 0,3 metriä tiivistemoreeniin.

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/5 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksissa liitteessä 3/19.

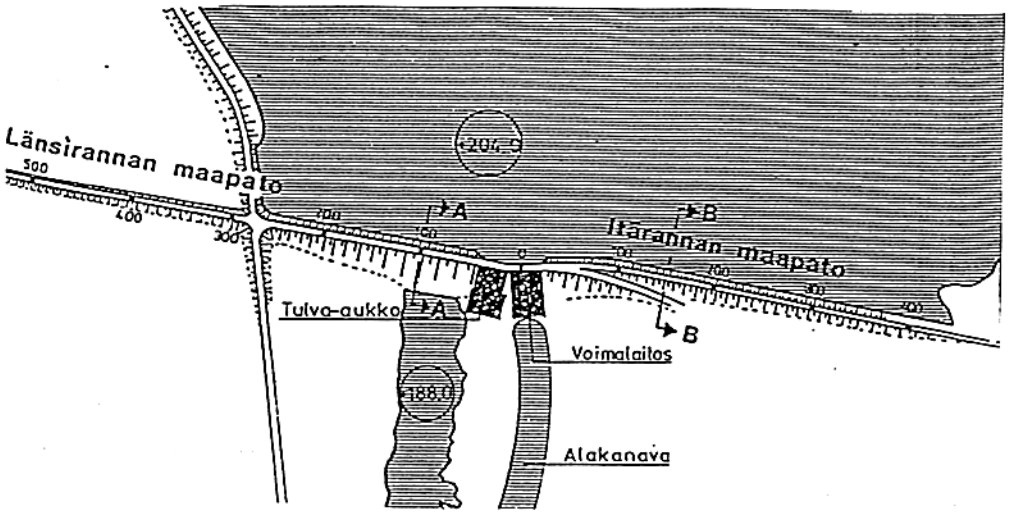
6.21 Vajukosken voimalaitospadot

6.21.1 Yleistä

Vajukosken voimalaitos rakennettiin vuosina 1982 – 1984 Porttipahdan tekojärvestä Kemijärveen laskevaan Kitiseen. Voimalaitoksen koneasema ja tulva–aukkorakenteet olivat maapadon itäisen ja läntisen osan välissä (kuva 45).

Patojen harjan korkeustaso oli +206,50 m, voimalaitoksen ylävesipinta oli HW + 204,00 m ja maapatojen kuivavara oli 2,50 metriä. Padon maksimikorkeus uoman pohjalta padon harjalle oli noin 16,50 m. Maapatojen pohjalta oli poistettu koko leveydeltä pintamaat ja pehmeät maakerrokset kallioon tai kiinteään kitkamaa– ja moreenikerrokseen asti. Padon alitse tapahtuva suotautuminen voimalaitoksen vieressä oli estetty valamalla padon pohjalle kalliopinnalle betonilaatta ja injektoimalla kallioon vesitiivis verho.

Padon rakennusmateriaalien laadun määrittämiseksi ja rakennustyön tarkkailemiseksi oli tehty laboratoriokokeita. Näytteistä oli määritetty maalaji, hienoainespitoisuus, vedenläpäisevyys ja vesipitoisuus. Taulukkoon 12 on koottu yhdistelmä koetuloksista (Auvinen 1990).



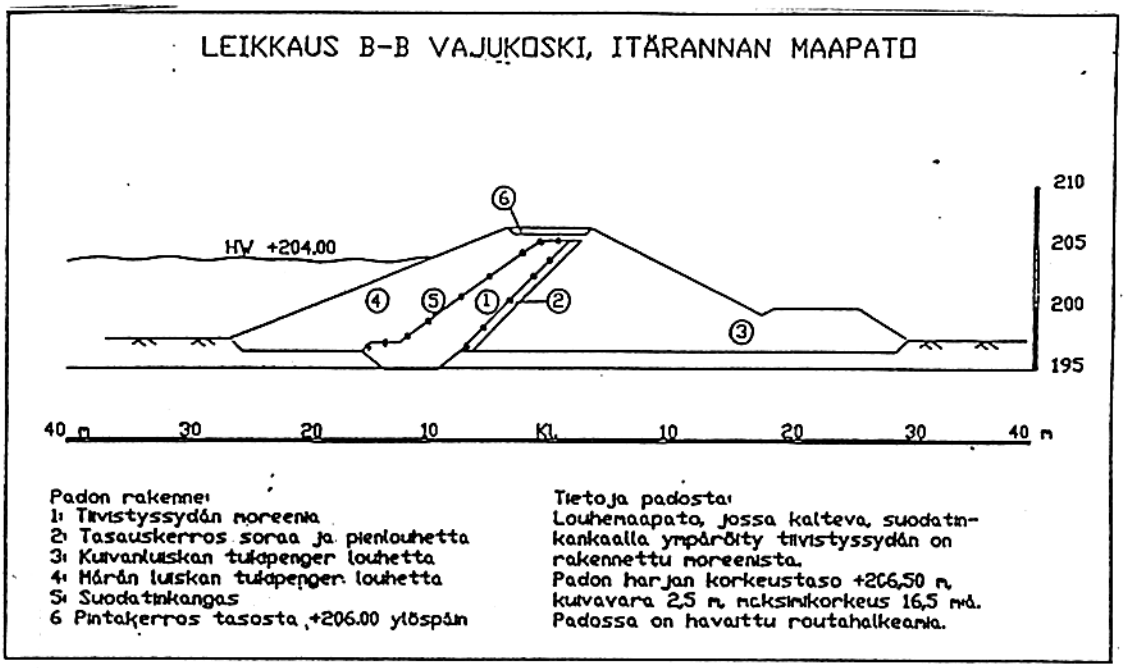
Kuva 45. Vajukosken voimalaitos, yleiskuva (Auvinen 1990)

Taulukko 12. Vajukosken maapatojen rakennusmateriaalien laboratoriokokeiden koetulosten yhdistelmä (Auvinen 1990). (X = keskiarvo, S = keskihajonta)

Paikka	Vajukoski					
Pato	Itärannan maapato		Länsirannan maapato			
Rakenneosa	Tiivistys-sydän		Tiivistys-sydän		Suodatin-kerros	
Keskiarvo- ja keskihajonta	X	S	X	S	X	S
Vesipitoisuus W (%)	9,2	1,6	9,2	2,9	3,0	1,3
Optimi-vesipitoisuus W_{opt} (%)	6,9	0,5	7,1	1,9	4,5	0,8
Hienoaines-pitoisuus 0,06/6 (%)	29	10	36	10	6	3
Tiiviysaste D (%)	97	2	97	3	96	2
Kuivatiheys (kN/m^3)	20,9	–	21,1	–	22,7	–
Vedenläpäisevyys-kerroin k=10$^-$ (m/s)	9,1	0,3	7,8	0,4	5,6	1,2

6.21.2 Itärannan maapato

Itärannan maapato oli louhemaapato, jonka kalteva ja suodatinkankaalla ympäröity tiivistyssydän oli rakennettu moreenista. Padon harjalla ei ollut liikennettä tutkittavalla kohdalla. Itärannan maapadon tyyppipoikkileikkaus esitetään kuvassa 46.



Kuva 46. Vajukoski, itärannan maapadon tyyppipoikkileikkaus (Auvinen 1990).

Kuvassa 47 esitetään tiivistyssydämen rakennusaikaisten rakeisuusmääritysten tuloksia. Tiivistyssydämen rakennusmateriaalia voitiin rakeisuuden perusteella pitää routivana. Padon tukipenkereet oli rakennettu louheesta.

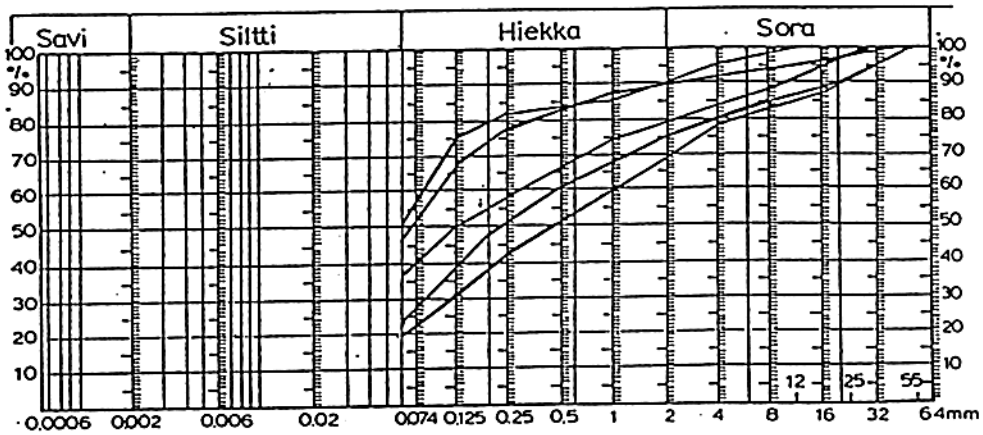
Työselityksessä oli määrätty kuivan luiskan tukipenkereen suurimmaksi sallituksi louhekooksi 0,50 m. Lisäksi penger oli määrätty tiivistettäväksi kerroksittain (0,80 – 1,00 m) vähintäin 8 tonnin täryjyrällä 8 – 10 ylityskertaa käyttäen. Jyräyksen aikana oli pengertä määrätty kasteltavaksi vähintään yhtä suurella vesimäärällä kuin on tiivistettävän kerroksen tilavuus.

Alavirran puoleisessa tukipenkereessä niillä osin, missä luiska on jyrkempi kuin 1:2, ja ylävirran puoleisessa luiskassa kiviheitoke oli määrätty tehtäväksi louheesta, jossa oli yli puolet raekooltaan 350 mm kiviä.

Ylävirran puoleinen tukipenger ja ne osat alavirran puoleisesta tukipenkereestä, jotka olivat kaltevuudessa 1:2, oli määrätty tehtäväksi louheesta, jonka suurin sallittu raekoko oli 2/3 kerrallaan tiivistetyn kerroksen paksuudesta. Tiivistäminen kasteluineen oli tehtävä 4 – 8 jyräyskertaa käyttäen kuten alavirran puoleisessa tukipenkereessä.

Vuonna 1987 suoritetussa tarkastuksessa oli havaittu padon harjalla pituussuuntainen halkeama paaluvälillä Pl 70 – 115. Halkeaman leveys oli ollut 50 – 100 mm ja syvyys noin 0,50 m (Auvinen 1990).

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/5 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksessa liitteessä 3/20.

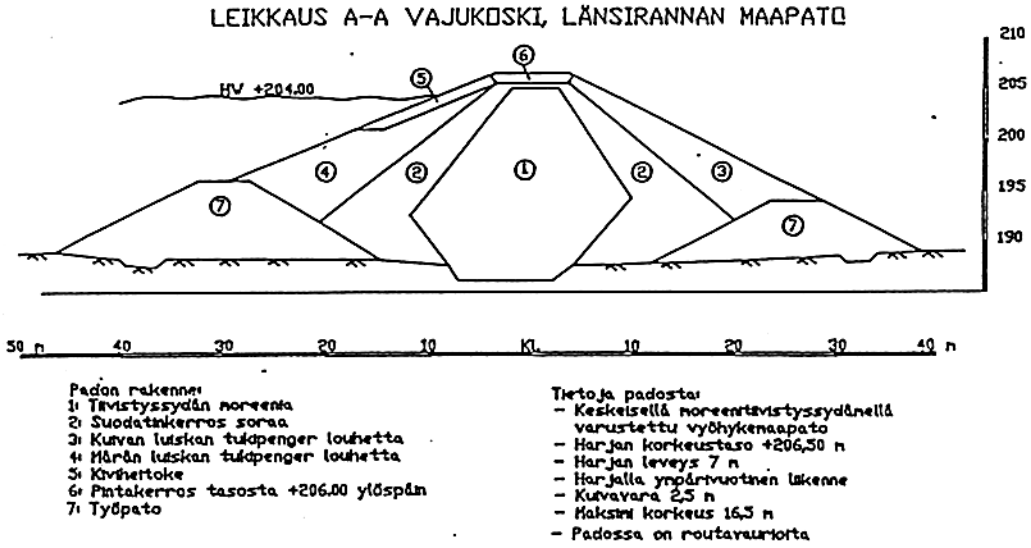


Kuva 47. Vajukoski, itärannan padon tiivistyssydämen rakennusaikaisten rakeisuusmääritysten tuloksia (Auvinen 1990).

6.21.3 Länsirannan maapato

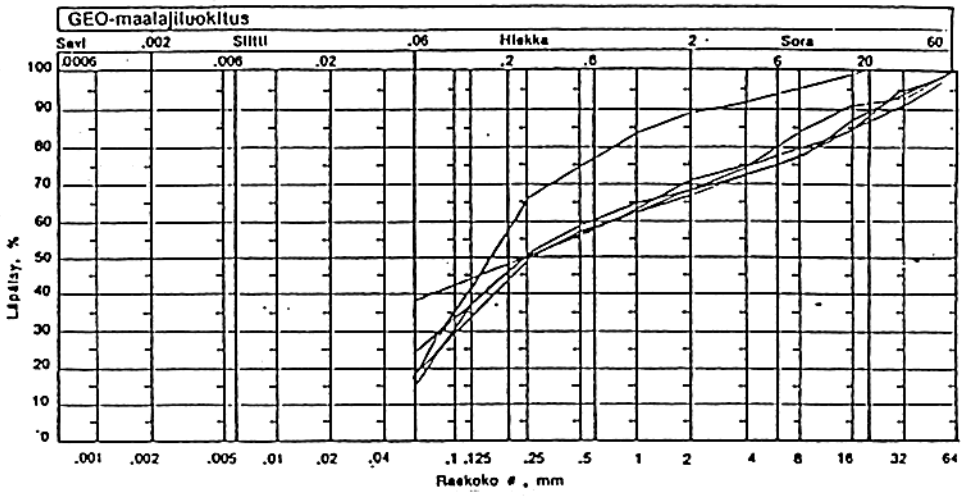
Länsirannan maapato oli vyöhykemaapato, jossa oli keskeinen moreenitiivistyssydän. Suodatinkerros oli soraa ja tukipenkereet olivat louhetta (kuva 39). Padon harjalla kulkee ympärivuotisesti liikennöitävä tie.

Vuonna 1987 suoritetussa tarkastuksessa oli havaittu padon harjalla pituussuuntainen halkeama poikkileikkauksessa Pl 200 (Auvinen 1990). Länsirannan maapadon tyyppipoikkileikkaus esitetään kuvassa 48.

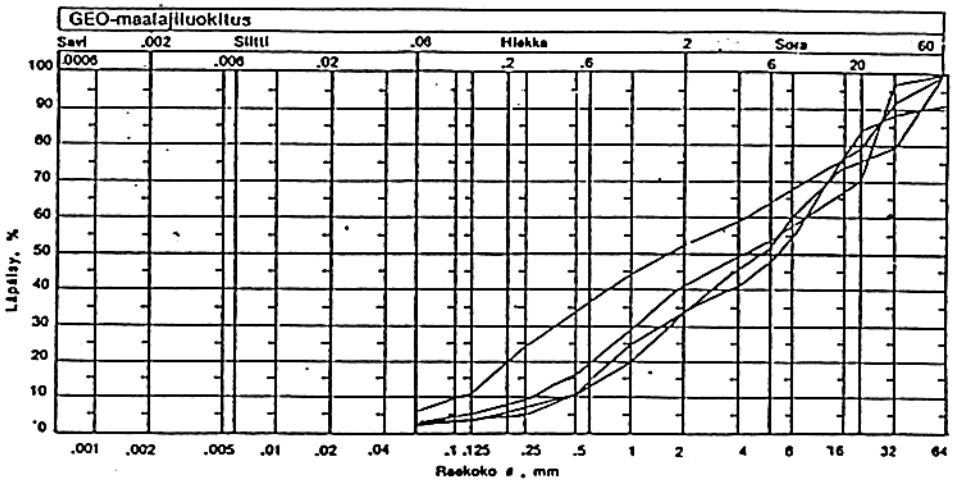


Kuva 48. Vajukoski, länsirannan maapadon tyyppipoikkileikkaus (Auvinen 1990).

Eri rakennusmateriaalien rakeisuusmääritysten tuloksia esitetään kuvissa 49a ja 49b. Tiivistyssydämen rakennusmateriaalina käytetty moreeni (kuva 49a) oli rakeisuuden perusteella routivaa. Sorasuodattimen koetuloksissa oli yksi rakeisuuskäyrä, jonka mukaan suodatinaines on rakeisuuden perusteella routivaa (kuva 49b). Muiden seulontatulosten mukaan suodatinaines oli routimatonta. Tukipenkereet oli rakennettu louheesta kuten itärannan maapadossa.



Kuva 49a. Vajukosken länsirannan padon tiivistyssydämen rakeisuusmäärityksiä (Auvinen 1990).



Kuva 49b. Vajukosken länsirannan padon suodatinkerroksen rakeisuusmäärityksiä (Auvinen 1990).

Vajukosken maapadoilla mitattiin roudan syvyyttä ainakin talvina 1984 – 85 ja 1985 – 86 asentamalla yksi routamittari länsipuolen maapadon poikkileikkaukseen Pl 1+00 ja toinen routamittari itäpuolen maapadon poikkileikkaukseen Pl 1+55. Länsipuolen maapadon routamittarilla mitattiin roudan syvyyttä padon harjalla tiivistesydämessä ja itäpuolen padon routamittari tukipenkereen louheessa (liite 4/85).

Talvella 1984 – 85 routa ulottui molemmissa padoissa HW–tason alapuolelle 0,20 – 0,58 m, jolloin roudan syvyys oli 2,70 – 3,08 m. Talvella 1985 – 86 roudan suurin syvyys oli 2,22 – 2,31 m (liite 2/7).

Padon rakennekerrokset routamittareiden kohdalla esitetään liitteessä 1/5 ja routamittareiden sijainti patopoikkileikkauksessa liitteessä 3/20.

7 PADOILLA HAVAITUT ROUTAVAURIOT

7.1 Yleistä

Patorakenteen jäätymistä rakennusaikana tulevan HW–tason alapuolelle pidettiin osasyynä Uljuan ja Hautaperän padoissa tekojärvien ensimmäisen täytön jälkeisenä kesänä syntyneisiin vaurioihin. Useilla padoilla havaittiin keväisin padon harjan pinnassa pitkittäisiä halkeamia, jotka olivat roudan sulamisen jälkeen umpeutuneet. Routahalkeamien havainnoinnin yhteydessä ei harjan routanousua mitattu.

7.2 Uljua, Tulisaaren pato

Uljuan tekojärven Tulisaaren vyöhykepadon poikkileikkauksessa Pl 5+30/2 sattui vuoto kesäkuun alussa 1970 altaan vesipinnan ensi kertaa saavutettua HW–tason. Vuoto tukittiin ajamalla moreenia vuotokohdalle märkään luiskaan. Varsinainen korjaustyö tehtiin kesän aikana, jolloin tiivistesydämen yläosaa tiivistettiin maainjektoinnilla. Mahdollisena vuodon osasyynä pidettiin tiivistesydämen harjaosan moreenin jäätymistä. Olosuhteet routaantumiselle olivat poikkeukselliset, koska talvella 1969 – 70 altaassa ei ollut vielä vettä.

Normaalissa käyttötilanteessa altaassa olevaan veteen sitoutunut lämpö vaikuttaa pienentävästi roudan syvyyteen padon harjalla. Vyöhykepadon harjaa nostettiin noin 0,5 metriä tapahtuneen vaurion seurauksena.

Roudan syvyyksiä mitattiin vyöhykepadossa vuosina 1971 – 1973, jolloin roudan syvyys oli suurimmillaan 2,5 – 2,7 metriä. Keväällä 1972 routa ulottui HW–tason alapuolelle.

7.3 Hautaperän pato

Hautaperän tekojärven padon kuivassa luiskassa tapahtui kesällä 1976 luiskan sortuma. Pato valmistui edellisenä syksynä lukuunottamatta sorasta tehtävää harjan ylintä rakennekerrosta. Korkeimmalla pato–osalla suunnitelman mukainen harjan taso oli +101,40 – 101,60 m ja altaan HW–taso on +99,75 m.

Keväällä 22. – 23. 4. 1976 mitattiin roudan syvyydet padon harjan keskilinjalta, jolloin poikkileikkauksessa Pl 3+00 roudan syvyys valmiin rakenteen pinnasta mitattuna oli 2,26 m ja poikkileikkauksessa Pl 33+00 3,30 m. Padon harjan sorakerros rakennettiin talvella 1976, jolloin padon yläosa oli jo routaantunut (Körkkö ym. 1983).

Keväällä 1976 altaan vesipinta nousi ensikertaa ylärajalle.

Routa tunkeutui poikkileikkauksessa Pl 3+00 tasolle +99,00 m ja Pl 33+00 tasolle +98,16 m eli huomattavasti HW–tason +99,75 m alapuolelle. Täten routiminen oli saattanut myötävaikuttaa kesällä 1976 tapahtuneeseen kuivan luiskan yläosan sortumaan.

Kesällä 1976 padon harjan sorakerrosta korotettiin 0,3 – 0,5 metrillä routasuojauksen parantamiseksi, jolloin harjan tasoksi tuli +101,75 – 101,95 m ja kuivavaraksi 2,0 – 2,2 metriä. Vuosina 1977 – 1980 suurimmat roudan syvyydet poikkileikkauksissa Pl 8+00, Pl 10+15 ja Pl 33+00 padon harjalla olivat olleet 1,86 – 2,27 m.

7.4 Vaasan vesi– ja ympäristöpiirin kunnossapitämät padot

Toukokuussa keväällä 1979 tarkastettiin kaikki Vaasan vesi– ja ympäristöpiirin alueella olevien valtion omistamien tekojärvien maapadot roudan sulamisvaiheessa, koska talven 1978 – 79 kovien pakkasten johdosta oli odotettavissa, että routa tunkeutuessaan syvälle patorakenteisiin saattaisi aiheuttaa padon harjalla näkyviä halkeamia.

Pitkämön altaan maapatojen halkeamahavainnot tehtiin 14.5.1979. Pääpadossa ei havaittu halkeamia, sivupadoissa oli paikoitellen aivan vähäisiä hiushalkeamia.

Hirvijärven ja Varpulan altaan maapadot tarkastettiin 18.5.1979. Maapadoissa ei havaittu halkeamia.

Kivi– ja Levälammen altaan maapadossa todettiin keväällä 1979 pitkittäinen halkeama keskellä patoa paaluvälillä Pl 5+00 – 13+00. Halkeama oli suurimmillaan paaluvälillä Pl 8+00 – 10+00, jossa sen leveys oli noin 0,015 – 0,02 m.

Liikapuron altaalla maapadon harjan halkeamahavainnot tehtiin 23.5.–79. Padossa havaittiin melko pahoja pitkittäissuuntaisia halkeamia seuraavilla paaluväleillä:

Paaluväli	Halkeaman sijainti
11+80 – 12+10	pääasiassa padon keskellä
13+20 – 13+40	padon ulkoreunassa
13+30 – 15+40	suodattimen rajassa altaan puolella
23+80 – 25+00	padon molemmissa reunoissa

Kalajärven altaan maapadon harjalla suoritettiin sekä roudan syvyyden mittauksia että halkeamahavaintoja. Suurimmillaan routa ulottui noin 2 metrin syvyyteen. Routa oli sulanut täysin kesäkuun alkuun mennessä. Roudan syvyyden mittauksia suoritettiin 8.–9.5.1979 seuraavissa poikkileikkauksissa:

Poikkileikkaus	Padon kl		Kuiva luiska
Pl	sula	roudassa	
11+00	0 – 1,00 m	1,00 – 1,85 m	sula
17+50	0 – 0,80 m	0,80 – 1,50 m	sula
5+50(M)	0 – 0,90 m	0,90 – 1,50 m	sula
63+00	0 – 0,90 m	0,90 – 2,00 m	sula
68+00	0 – 1,00 m	1,00 – 2,00 m	sula
71+00	0 – 1,00 m	1,00 – 1,90 m	sula
73+00	0 – 1,00 m	1,00 – 1,85 m	sula

Lisäksi mitattiin roudan syvyys poikkileikkauksessa Pl 68+00 vielä 25.5.1979, jolloin sitä ei enää ollut kuin 0,15 m syvyystasolla 1,85 – 2,00 m padon harjalta lukien.

Kalajärven maapadon harjan halkeamahavainnoissa 25.5.1979 todettiin pitkittäissuuntaisia halkeamia seuraavilla paaluväleillä:

Paaluväli	Halkeaman sijainti
84+00 – 84+50	padon ulkoreunassa
81+70 – 81+90	padon keskellä
71+00 – 71+20	padon keskellä
70+15 – 70+50	padon keskellä
62+80 – 66+80	padon keskellä
62+30 – 62+80	suodattimen rajassa altaan puolella

Tarkastuksen lopputuloksena asennettiin syksyllä 1979 routamittareita pysyvää tarkkailua varten useisiin Vaasan vesi- ja ympäristöpiirin patoihin.

7.5 Kokkolan vesi- ja ympäristöpiirin kunnossapitämät padot

Keväällä 1984 todettiin Kokkolan vesi- ja ympäristöpiirissä sijaitsevien Venetjoen ja Patanan maapatojen harjalla routahalkeamia. Venetjoen padossa vaurioita oli pato-osalla Pl 13+00 – 25+00 ja Patanan padossa Pl 5+02 – 7+40.

Keväällä 1985 Venetjoen maapadon harjalla oli vähäisiä pitkittäissuuntaisia routahalkeamia Pl 6+00 – 36+70, mutta ne olivat lähes kokonaan eri pato-osuuksilla kuin edellisenä keväänä.

Keväällä 1986 routavauriot Venetjoen ja Patanan padoilla olivat pahempia ja niitä oli runsaammin.

Venetjoen maapadolla 15.5.1986 suoritetussa kunnossapitotarkastuksessa todettiin padon harjalla pitkittäissuuntaisia routahalkeamia seuraavilla paaluväleillä:

Paaluväli	Halkeaman sijainti*) ja leveys	
– 1+80 – 2+80	keskellä	
– 4+00 – 5+00	useita rinnakkain	
– 6+70 – 6+80	keskellä	
– 13+00 – 13+80	oikeassa reunassa	leveys 0 – 0,05 m
– 13+60 – 13+90	keskellä	leveys 0 – 0,05 m
– 13+90 – 14+20	oikeassa reunassa	
– 14+40 – 17+20	oikeassa reunassa ja keskellä	leveys 0 – 0,05 m
– 17+55 – 17+90	oikeassa reunassa	
– 18+20 – 18+40	oikeassa reunassa	
– 19+95 – 20+40	oikeassa reunassa	
– 23+05 – 23+45	oikeassa reunassa	
– 23+80 – 24+10	oikeassa reunassa	
– 36+70 – 37+10	vasemmassa reunassa	

*)Halkeaman sijainnilla vasemmassa reunassa tarkoitetaan padon harjan altaan puolta ja oikeassa reunassa vastaavasti harjan kuivaa puolta.

Patanan maapadolla 4.6.1986 suoritetussa kunnossapitotarkastuksessa todettiin padon harjalla pitkittäissuuntaisia routahalkeamia seuraavilla paaluväleillä:

Paaluväli	Halkeamien sijainti sekä leveys ja syvyys		
- 0+50 - 2+60	keskellä	leveys 0,01 - 0,10 m	syvyys 0,2 - 0,5 m
- 3+00 - 3+60	oikealla	leveys 0 - 0,07 m	syvyys 0,1 - 0,4 m
- 6+00 - 6+20	vasemmalla	leveys 0,01 - 0,05 m	syvyys 0,2 - 0,5 m
- 6+40 - 6+60	vasemmalla	leveys 0,01 - 0,05 m	syvyys 0,1 - 0,2 m
- 7+10 - 7+40	keskellä	leveys 0,01 - 0,04 m	syvyys 0,1 - 0,2 m
- 10+10 - 10+30	keskellä	leveys 0,01 - 0,02 m	syvyys 0,1 - 0,3 m
- 11+00 - 11+40	keskellä	leveys 0,01 - 0,03 m	syvyys 0,1 - 0,3 m
- 16+40 - 16+60	keskellä	leveys 0 - 0,01 m	syvyys 0,05 - 0,1 m
- 23+30 - 24+55	keskellä	leveys 0,01 - 0,05 m	syvyys 0,1 - 0,5 m
- 25+95 - 26+60	oikealla	leveys 0 - 0,04 m	syvyys 0,05 - 0,25 m
- 26+80 - 27+05	keskellä	leveys 0 - 0,02 m	syvyys 0,05 - 0,25 m
- 27+20 - 27+45	keskellä	leveys 0 - 0,03 m	syvyys 0,05 - 0,35 m

7.6 Petäjäskosken ja Vajukosken padot

Osalla Petäjäskosken maapadoista oli esiintynyt vuosittain pituussuuntaisia halkeamia maapadon keskilinjalla. Halkeamien leveys oli ollut 30–50 mm ja syvyys 0,50 m.

Vajukosken itärannan maapadolla vuonna 1987 suoritetussa tarkastuksessa oli havaittu padon harjalla pituussuuntainen halkeama paaluvälillä Pl 70 – 115. Halkeaman leveys oli ollut 50 – 100 mm ja syvyys noin 0,50 m. Vajukosken länsirannan maapadossa oli havaittu padon harjalla pituussuuntainen halkeama poikkileikkauksessa Pl 200.

7.7 Patovalvontaviranomaisen ohjeita

Talvien 1984 – 85 ja 1986 – 87 jälkeisinä keväinä vesi– ja ympäristöhallitus lähetti piirihallintoon kirjeen, jossa kehotettiin tiedottamaan padon omistajille normaalia suuremmista padon harjan roudan syvyyksistä. Em. talvet olivat pakkasmäärältään koko Suomessa kerran 20 vuodessa toistuvan pakkasmäärän luokkaa (liite 7).

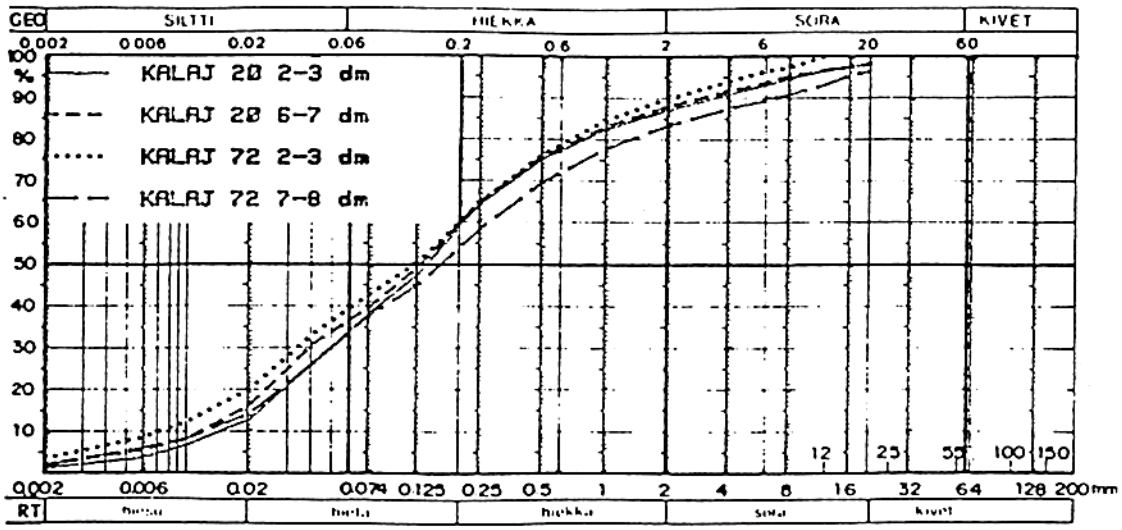
Vaurioiden välttämiseksi padon omistajaa kehotettiin jättämään altaan vesipinta esimerkiksi arvioidun tai mitatun roudan syvyyden tasolle ja täyttämään allas ylärajalle vasta kuukauden kuluttua siitä, kun routa oli täysin sulanut.

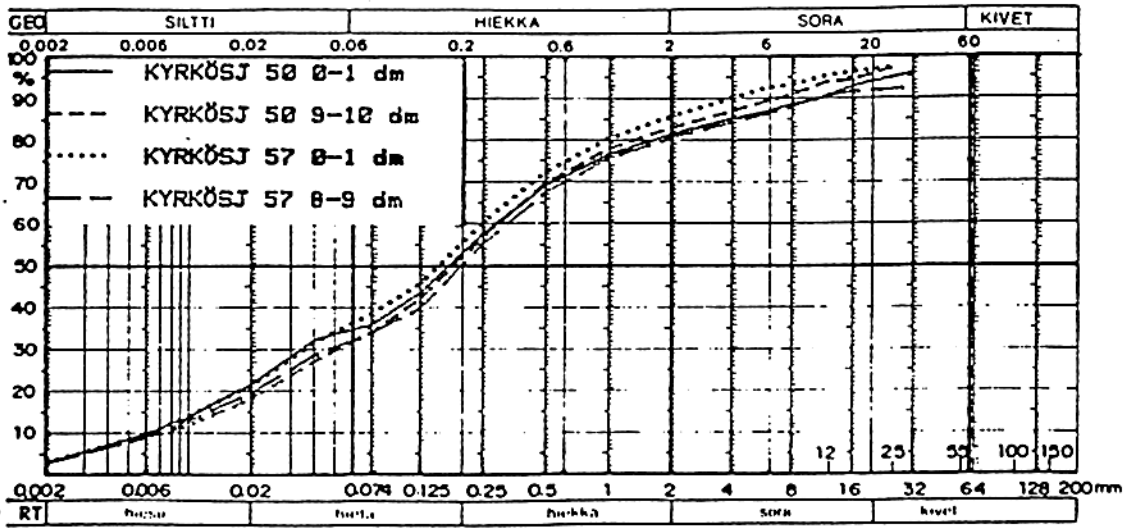
8 LABORATORIOKOKEET JA ROUDAN SYVYYDEN ARVIOIMISESSA KÄYTETYT OMINAISUUSARVOT

8.1 Yleistä

Vuonna 1986 tutkittiin Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laboratoriossa Kalajärven ja Kyrkösjärven maapatojen moreenin routivuusominaisuuksia (TTKK 1987). Näytteistä määritettiin ominaispinta-ala, kapillaarinen nousukorkeus ja routanousunopeus. Kalajärven näytteet olivat poikkileikkauksista Pl 20+00 ja Pl 72+00 ja Kyrkösjärven näytteet poikkileikkauksista Pl 50+75 ja Pl 57+00 padon harjaosasta HW-tason yläpuolelta.

Rakeisuutensa puolesta näytteet olivat hyvin tasalaatuista silttistä hiekkamoreenia. Rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 50.





Kuva 50. Kalajärven ja Kyrkösjärven moreeninäytteiden rakeisuuskäyrät (TTKK 1987).

Keväällä 1993 tutkittiin Oulun yliopiston geoteknillisessä laboratoriossa Kyrkösjärven moreeninäytteiden lämpöteknisiä ominaisuuksia (OY 1993).

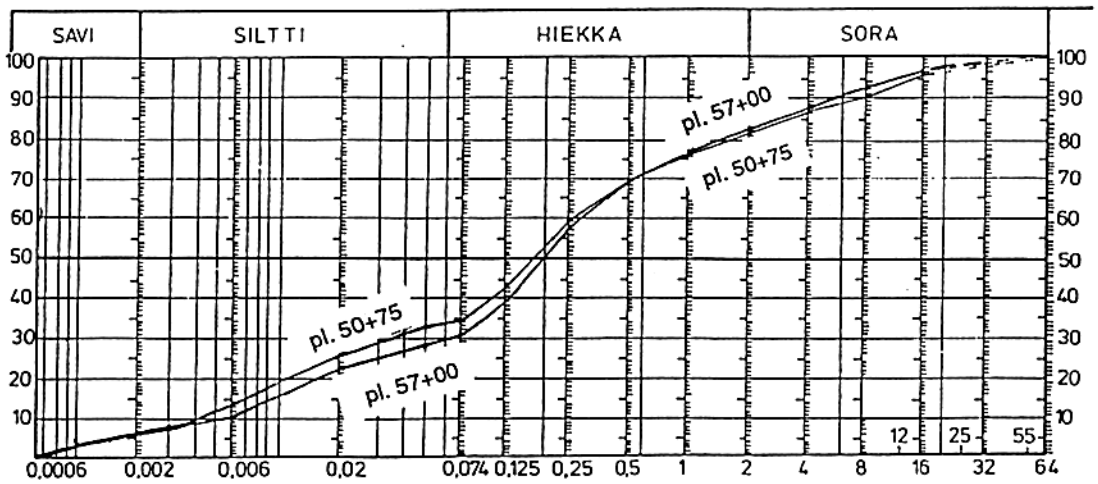
Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää tutkittavasta materiaalista lämmönjohtavuus sekä tiiveyden, vesipitoisuuden ja lämpötilan vaikutus lämmönjohtavuuteen. Lisäksi määritettiin jäätymättömän veden määrä jäätyneessä näytteessä lämpötilan funktiona.

Näytteet oli otettu samoista poikkileikkauksista kuin Tampereella TTKK:ssa 1986 tutkitut näytteet; Pl 50+75 korkeustaso + 81,50 – 82,00 ja Pl 57+00 korkeustaso + 81,50 – 82,00. Näytteet seulottiin ja niistä määritettiin kvartsipitoisuus Oulun Yliopiston Elektronioptiikan laitoksen röntgendiffraktometrillä. Rakeisuudeltaan näytteet poikkesivat toisistaan vain vähän (kuva 51), mutta kvartsipitoisuuksissa oli selvä ero. Poikkileikkauksesta Pl 50+75 otetun näytteen kvartsipitoisuus oli 25,0 % ja poikkileikkauksesta Pl 57+00 otetun 9,3 %.

Moreenin kvartsipitoisuus vaihtelee eri raekokoalueilla noin 5 – 50 %:n välillä (Sundberg 1988).

Koska suurempi kvartsipitoisuus merkitsi suurempaa lämmönjohtavuutta, päädyttiin siihen, että määritykset suoritetaan Pl 50+75 näytemateriaalille. Tällöin tulokset olivat "varmemmalla puolella".

Tutkittavalle moreenille määritettiin maksimitiiveys ja optimivesipitoisuus parannetulla Proctor–sullonnalla. Näytteestä poistettiin suurimmat kivet ≠16 mm:n seulalla. Seulotulle materiaalille saatiin maksimitiiveydeksi $\gamma_{d\ maks}$ = 20,60 kN/m^3 ja optimivesipitoisuudeksi w_{opt} = 6,45 %. Vastaavat korjatut arvot ovat $\gamma'_{d\ maks}$ = 21,26 kN/m^3 ja w'_{opt} = 5,55 %.



Kuva 51. Kyrkösjärven moreeninäytteiden rakeisuuskäyrät (OY 1993).

8.2 Moreenin routivuuden määritys

8.2.1 Ominaispinta-ala

Ominaispinta-ala määritettiin typpiadsorptiomenetelmällä, joka perustuu matalassa lämpötilassa (-196 °C) tapahtuvaan typpikaasun adsorptioon. Mittauksessa määritettiin piste, jossa näytteen pinnalle on muodostunut yksimolekyylaarinen kaasukerros nestemäisen typen ollessa lämpötilassa - 196 °C. Laitteisto mittaa kaasun (N_2) määrän ja muuttaa sen näytteen kokonaispinta-alaksi (Nieminen 1985). Mitatut ominaispinta-alat on esitetty taulukossa 13. Kyrkösjärven moreenin ominaispinta-ala oli 5150-5890 m^2/kg ja Kalajärven moreenin 3100-3890 m^2/kg .

Taulukko 13. Näytteiden ominaispinta-alat N_2-menetelmällä mitattuna (TTKK 1987).

Pato	Pl	Näytesyvyys	Ominaispinta-ala
Kyrkösjärvi	50+75	0 - 10 cm	5890 m^2/kg
		90-100 cm	5680
	57+00	0 - 10 cm	5150
		80- 90 cm	5180
Kalajärvi	20+00	20- 30 cm	3230
		60- 70 cm	3100
	72+00	20- 30 cm	3890
Uljua			600-1300
Inarinjärven ympäristö			2490-14480

Taulukosta 13 ilmenee moreenien ominaispinta-alan suuri vaihtelu, kun mukana on myös Uljuan Tulisaaren padon hiekkamoreeni sekä Inarinjärven alueen siltti- ja hiekkamoreeni (Huttunen 1991).

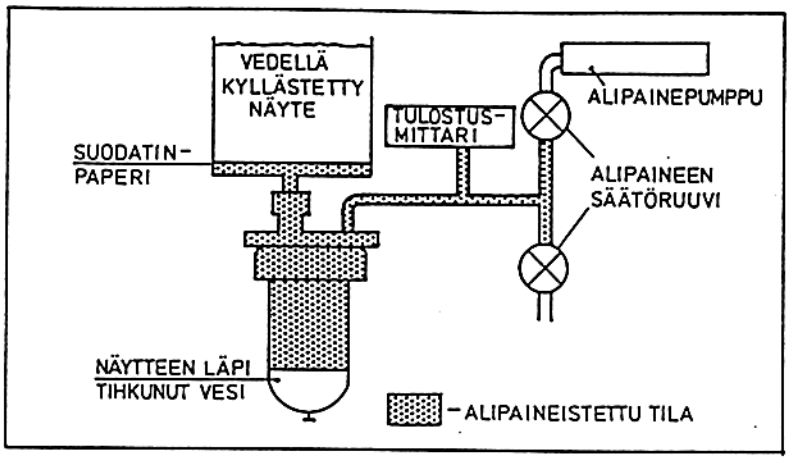
Nieminen (1985) on esittänyt moreenin routivuuden arvioimiseksi ominaispinta-alan perusteella seuraavan kriteerin, joka on herättänyt paljon keskustelua. Routivuuden voimakkuuden arvioiminen ominaispinta-alan perusteella vaatii lisää tutkimuksia. Niemisen mukaan moreeni on yleensä erittäin routivaa, jos typpiadsorptiolla määritetty ominaispinta-ala on yli 10000 m^2/kg. Ominaispinta-alan ollessa 5 000 -10 000 m^2/kg moreeni on keskinkertaisesti tai vähän routivaa ja sen jäädessä alle 5 000 m^2/kg moreeni on yleensä routimatonta.

Ominaispinta-alojen perusteella Kyrkösjärven moreeni olisi keskinkertaisesti tai vähän routivaa ja Kalajärven moreeni olisi routimatonta (taulukko 16).

8.2.2 Kapillaarisuus

Sekoitetuista näytteistä tehtiin vielä ennen routanousukoetta kapillaarisuusmääritys. Kapillaarinen nousukorkeus määritettiin kapillaarimetrillä. Laitteiston toimintaperiaate on esitetty kuvassa 52 (Sahi 1985). Kapillaarimetrissä vedellä kyllästetyn näytteen päiden välille aiheutettiin paine-ero ja mitattiin se alipaine, jolla ensimmäinen

ilmakupla tunkeutui näytteen läpi. Mitattu alipaine muunnettiin vesipatsaan korkeudeksi, jota nimitettiin kapillaariseksi nousukorkeudeksi.



Kuva 52. Kapillaarisuuden mittauslaitteisto (Sahi 1985).

Taulukossa 14 esitetyistä tuloksista käy ilmi, että näytteiden kapillaarisuus vaihteli yllättävän paljon rakeisuudeltaan samankaltaisten näytteiden kesken. Vaihtelua saattaa aiheuttaa näytteiden huokoskokojakautumien ja huokostilavuuksien pienet eroavuudet. Kyrkösjärven moreenin kapillaarisuus vaihteli 3,10 – 4,70 m välillä ja Kalajärven moreenin 1,10 – 4,10 m välillä.

Taulukko 14. Sekoitettujen moreeninäytteiden kapillaarisuudet (TTKK 1987).

Pato	Pl	Kapillaarinen nousukorkeus
Kyrkösjärvi	50+75	4,70 m
	57+00	3,10 m
Kalajärvi	20+00	1,10 m
	72+00	4,10 m

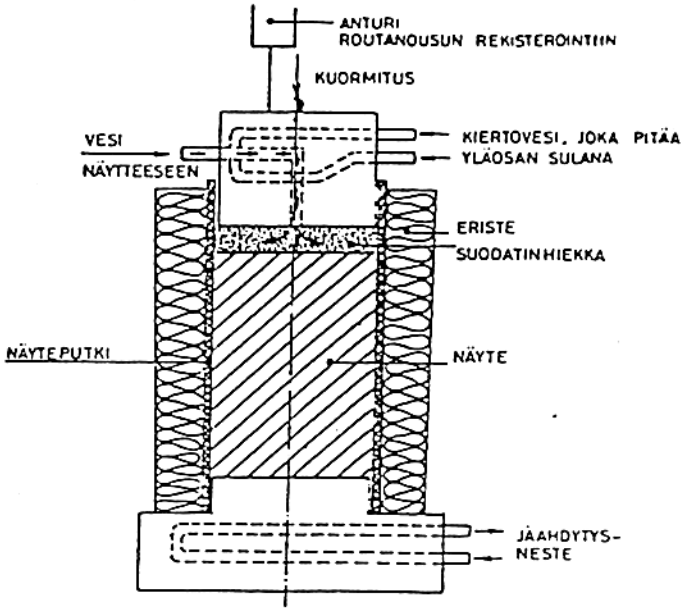
Kapillaarisen nousukorkeuden perusteella Kyrkösjärven moreeni Pl 50+75 ja Pl 57+00 oli erittäin routivaa ja Kalajärven moreeni Pl 20+00 oli lievästi routivaa ja Pl 72+00 oli erittäin routivaa (taulukot 1 ja 16).

8.2.3 Routanousukoe

Routanousukokeissa vedellä kyllästetty näyte tiivistettiin ensin staattisesti 42 kPa:n pintakuormituksella. Kun painumista ei enää tapahtunut kuormitusta kevennettiin 17,3 kPa:iin ja näytettä alettiin jäädyttää alhaalta päin. Kuvassa 53 on esitetty TTKK:n routanoususelli. Routanousu rekisteröitiin piirturilla ajan funktiona. Routanousukäyristä on laskettu taulukkoon 15 routanousunopeus jäädytysnesteen lämpötiloille −10 °C ja −20°C.

Lämpötilassa −10°C Kyrkösjärven moreenin routanousunopeus oli 1,7–2,1 mm/d ja Kalajärven moreenin 0,5–2,2 mm/d.

Lämpötilassa −20°C Kyrkösjärven moreenin routanousunopeus oli 4,5–6,3 mm/d ja Kalajärven moreenin 1,2–5,8 mm/d.



Kuva 53. Routanousukokeissa käytetty routaselli (TTKK 1987).

Taulukko 15. Routanousunopeudet 17,3 kPa kuormituksella tehdyssä kokeessa (TTKK 1987).

	PL	−10°C	−20°C
Kyrkösjärvi	50+75	1,7 mm/d	6,3 mm/d
	57+00	2,1 mm/d	4,5 mm/d
Kalajärvi	20+00	0,5 mm/d	1,2 mm/d
	72+00	2,2 mm/d	5,8 mm/d

Routanousukokeiden konsolidaatiokuormitus ja pystykuormitus kokeen aikana olivat suurempia kuin ISSMFE:n routakomitean suosituksen mukaisessa routanousukokeessa (ISSMFE TC–8 1989).

8.2.4 Kalajärven ja Kyrkösjärven moreeninäytteiden routivuus

Yhteenvetona voitiin todeta, että moreenien ominaispinta–aloissa, kapillaarisessa nousukorkeudessa ja routanousunopeudessa saattoi olla suuriakin eroja, vaikka rakeisuuskäyrät eivät juuri poikenneet toisistaan. Kalajärven padon Pl 20+00 moreeni poikkesi eniten muista näytteistä em. ominaisuuksien suhteen. Rakeisuuden lisäksi tulisi moreenin routivuuden arvioimiseksi määrittää myös kapillaarinen nousukorkeus.

Taulukossa 16 on esitetty Kalajärven ja Kyrkösjärven patomoreenien routivuus eri kriteerien perusteella.

Taulukko 16. Kalajärven ja Kyrkösjärven patomoreenien routivuus eri kriteerien perusteella (Friberg & Slunga 1989).

Pato	Kalajärvi			Kyrkösjärvi			
Pl	20+00		72+00	50+75		57+00	
Näytesyv. (m)	0.20–0.30	0.90–1.00	0.2–0.3	0–0.10	0.9–1.0	0–0.1	0.8–0.9
			LUOKITUSOMINAISUUDET				
Rakeisuus	Routiva	Routiva	Routiva	Routiva	Routiva	Routiva	Routiva
Ominais-pinta-ala	Routimaton	Routimaton	Routimaton	Keskink. tai vähän routiva	Keskink. tai vähän routiva	Keskink. tai vähän routiva	Keskink. tai vähän routiva
			HYDRAULISET OMINAISUUDET				
Kapillaarinen nousukorkeus	Lievästi routiva	Lievästi routiva	Erittäin routiva	Erittäin routiva	Erittäin routiva	Erittäin routiva	Erittäin routiva
			ROUTANOUSUNOPEUS				
TTKK *) (1987)	Lievästi routiva	Lievästi routiva	Erittäin routiva	Erittäin routiva	Erittäin routiva	Erittäin routiva	Erittäin routiva

*)Koe poikkeaa ISSMFE:n routakomitean suositusten mukaisesta koejärjestelystä, vaikka tuloksia on tulkittu suosituksen mukaisilla kriteereillä.

8.3 Moreenin lämpöteknisten ominaisuuksien määritys

8.3.1 Lämmönjohtavuuden määritys lämmönjohtavuussondilla

Moreeninäytteeseen upotettuun sondiin tuotetaan lämpöä vakioteholla q (W/m). Lämmönjohtavuus saadaan lämpötila–anturilla näytteen keskeltä havaitun lämpötilan muuttumisen perusteella, sillä lämpötilan muutosnopeus riippuu ympäröivän aineen kyvystä johtaa lämpöä. Sondimenetelmä on siten epästationäärinen, transientti menetelmä.

Menetelmä perustuu äärettömän pitkän, viivamaisen lämmönlähteen teoriaan. Lämmönjohtavuus voidaan määrittää yhtälön (26) mukaisesti sen suoran kulmakertoimesta, joka muodostuu, kun esitetään lämpötilan muutos ajan logaritmin suhteen (Sundberg 1988).

$$\lambda = \frac{q}{4\pi\,(T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \qquad (26)$$

T_1 ja T_2 ovat ajanhetkiä t_1 ja t_2 vastaavat lämpötilan nousut.

Kun sondit valmistetaan huolellisesti, mittauslaitteisto on asian mukainen ja varmistetaan hyvä kontakti sondin ja tutkittavan materiaalin välillä, menetelmällä saadaan luotettavia tuloksia. Lämmönjohtosondilla päästään hyvään toistettavuuteen (Viljas 1993).

Lämmönjohtavuus määritettiin eri lämpötiloissa taulukon 17 mukaisesti näytteestä, josta oli seulottu pois suurimmat kivet (> 16 mm).

Lisäksi näytteet, joiden tiiviysaste (parannettu Proctor) oli 80 %, 90 % ja 95 % maksimitiiviydestä, tutkittiin kuivana +18 °C:n lämpötilassa.

Ruostumattomasta Ø 4 mm:n teräsputkesta valmistettujen sondien pituus oli 95 mm. Sondin keskellä, pituuden puolivälissä oli K–tyypin termoparilanka. Sondin koko pituudella oli bifilaarisesti kierretty vastuslanka ja sondi oli täytetty hyvin lämpöä johtavalla massalla. Sondien (4 kpl) lisäksi mittauslaitteistoon kuului lämmönlähde, tarkkuuslämpömittari sekä mikrotietokone tiedonkeruu ja –käsittely–yksikkönä.

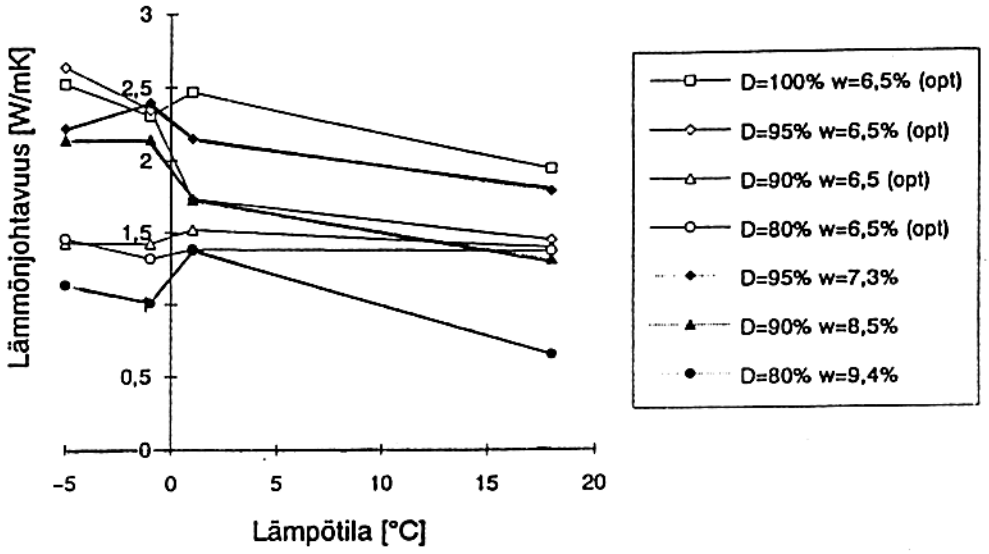
Sondit kalibroitiin mineraalivillalla, kvartsihiekalla ja vedellä (vesihyytelöllä, jossa veteen oli konvektion ehkäisemiseksi lisätty 0,25 paino–% Agar–hyytelöintiainetta). Tulosten perusteella kullekin sondille laskettiin kalibrointisuora (OY 1993), jonka avulla sondin antamasta tuloksesta saadaan lopullinen tulos.

Näytteet tiivistettiin IC–testerillä (Intensive Compaction tester). Oikean tutkimuslämpötilan saavuttamiseksi näytteet asetettiin vakiolämpötilahuoneessa olevaan solumuovilla eristettyyn laatikkoon, jossa oli pakkasnestettä. Laatikossa oli kupariputkikierukka, jossa kierrätettävän nesteen lämpötilaa säädettiin kryostaatilla. Näytteiden suojana olevilla kolmella muovipussilla varmistettiin, ettei pakkasneste tunkeutunut näytteisiin. Näytteiden lämpötilan annettiin tasaantua noin 2 vuorokautta.

Lämmönjohtavuusmittausten tulokset on esitetty numeroarvoina taulukossa 17 ja graafisesti muiden paitsi kuivien näytteiden osalta kuvassa 54.

Taulukko 17. Lämmönjohtavuusmittausten tulokset (OY 1993).

		Lämmönjohtavuus λ (W/mK)			
Näytteen tiiviys γ_d(kN/m^3)	Näytteen vesi–pit. w (%)	Tutkimuslämpötila (°C) –5	–1	+1	+18
20,6 (opt.)	6,5 (opt.)	2,518	2,308	2,466	1,939
19,6 (95% opt.)	0	–	–	–	0,787
	6,5 (opt.)	2,634	2,352	1,732	1,446
	7,9	2,217	2,395	2,150	1,785
18,5 (90% opt.)	0	–	–	–	0,532
	6,5 (opt.)	1,421	1,423	1,520	1,395
	8,5	2,136	2,147	1,725	1,309
16,5 (80% opt.)	0	–	–	–	0,434
	6,5 (opt.)	1,452	1,315	1,382	1,369
	9,4	1,131	1,007	1,374	0,652



Kuva 54. Lämmönjohtavuusmittausten tulokset (OY 1993).

Näytteen tiivistäminen, samoin kuin vesipitoisuuden lisäys kasvatti melko selvästi lämmönjohtavuutta. Vesipitoisuuden osalta näyte, jonka tiiviysaste oli 80 % optimitiiviydestä, käyttäytyi poikkeuksellisesti. Se antoi w = 9,4 % vesipitoisuudessa jopa selvästi pienempiä lämmönjohtavuuden arvoja kuin optimivesipitoisuudessa w = 6,5 %. Erityisesti +18 °C:n lämpötilassa mitattu lämmönjohtavuuden arvo on epäilyttävän pieni ja siihen tulee suhtautua suurella varauksella.

Eri tutkijat ovat kehittäneet teoreettisia laskentamenetelmiä maan lämmönjohtavuuden laskemiseksi (Farouki 1981, Sundberg 1988). Menetelmiä on esitetty esimerkiksi masuunihiekan lämpöteknisiä ominaisuuksia käsittelevässä tutkimuksessa (Viljas 1993).

Taulukossa 18 on verrattu Kerstenin menetelmällä moreenille laskettuja lämmönjohtavuuden arvoja lämmönjohtosondilla määritettyihin arvoihin. Kerstenin menetelmällä (kaavat 8 ja 9) lämmönjohtavuudenarvot laskettiin keskiarvona hienorakeiselle ja karkearakeiselle maalle annetuilla kaavoilla saaduista arvoista. Sondilla määritetyt jäätymättömän maan arvot olivat keskiarvoja +1 ^{0}C:n ja +18 ^{0}C:n lämpötiloissa määritetyistä arvoista. Vastaavasti jäätyneen maan arvot olivat keskiarvoja lämmönjohtavuuksista, jotka määritettiin −1 ^{0}C:n ja −5 ^{0}C:n lämpötiloissa.

Taulukko 18. Kerstenin menetelmällä ja lämmönjohtavuussondilla määritetyt moreenin lämmönjohtavuudet (OY 1993).

	Lämmönjohtavuus λ (W/mK)					
	γ_d = 20,6 kN/m^3		γ_d = 18,5 kN/m^3			
	w = 6,5 %		w = 6,5 %		w = 8,5 %	
	+	−	+	−	+	−
Sondi	2,20	2,41	1,46	1,42	1,52	2,14
Kersten	2,09	2,30	1,55	1,55	1,74	1,81

8.3.2 Jäätymättömän vesipitoisuuden määrittäminen jäätyneestä näytteestä

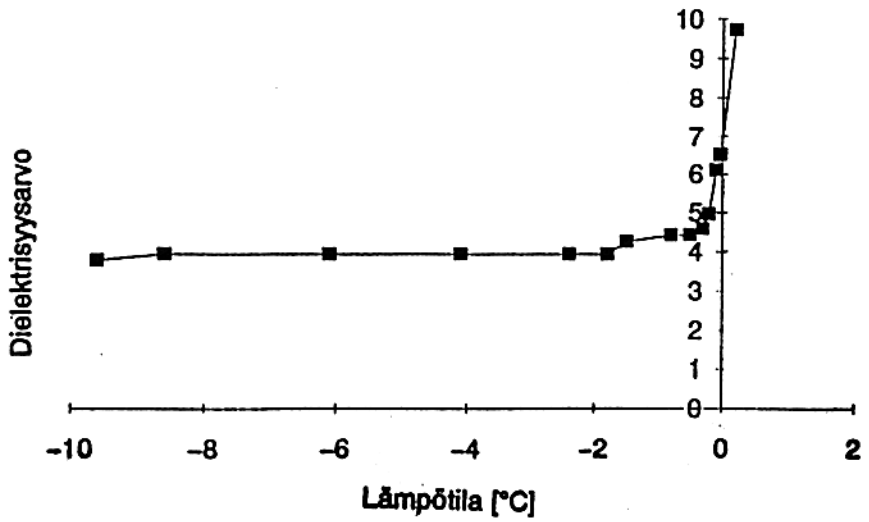
Vesipitoisuuden ohella veden olomuodolla on merkittävä vaikutus maan lämpötekni-siin ominaisuuksiin. Kun lämpötila laskee alle 0 ^{0}C:n, vesi alkaa jäätyä aluksi suurimpien maahuokosten keskellä. Lämpötilan edelleen laskiessa jäätyy myös lähempänä rakeiden pintaa oleva vesi asteittain. Mitä hienorakeisempaa maa on, sitä selvempää on jäätymisen asteittainen eteneminen lämpötilan laskiessa.

Vesipitoisuuden mittaus voidaan suorittaa kaapelitutkalla mitattavan dielektrisyysvaki-on avulla.

Maa–aineksen dielektrisyysvakio on noin 3 ja veden noin 80. Kaapelitutkalla voidaan määrittää maan dielektrisyysvakio, jonka perusteella saadaan laskennallisesti maan vesipitoisuus. Dielektrisyysvakion määrittämistä on kuvattu mm. lähteessä (Kerkelä 1990).

Koska jään dielektrisyysvakio (3 – 5) on lähellä maa–aineksen vastaavaa arvoa, voidaan jäätyneen näytteen sisältämän jäätymättömän veden määrä määrittää vastaavasti kuin sulan näytteen vesipitoisuus.

Jäätymätönn vesipitoisuus jäätyneessä näytteessä määritettiin Oulun yliopiston geoteknillisen laboratorion kaapelitutkalaitteistolla. Käytetyssä sondissa piikkien pituus oli 150 mm ja keskinäinen etäisyys 40 mm. Näyte oli tiivistämätön (γ_d = 15,1 kN/m^3) ja sen vesipitoisuus oli n. 12 %. Näytteen lämpötilaa muutettiin asteittain kylmästä lämpimään päin (kuva 55).



Kuva 55. Dielektrisyysvakio lämpötilan funktiona (OY 1993).

Taulukossa 19 on esitetty näytteelle eri lämpötiloissa mitatut dielektrisyysvakion arvot ja niiden perusteella arvioitu jäätymätön vesipitoisuus.

Taulukko 19. Dielektrisyysvakio ja jäätymätön vesipitoisuus (OY 1993).

Lämpötila (°C)	Dielektrisyysvakio	Jäätymätön vesipitoisuus w_{til}
−9,6	3,78	0
−8,6	3,94	0
−6,1	3,94	0
−4,1	3,94	0
−2,4	3,94	0
−1,8	3,94	0
−1,5	4,26	1,12
−0,8	4,43	1,71
−0,5	4,43	1,71
−0,3	4,60	2,31
−0,2	4,96	3,54
−0,1	6,10	7,34
−0,0(−0,05)	6,51	8,67
0,2	9,72	18,28

8.4 Roudan syvyyden laskemisessa käytetyt ominaisuusarvot

Kyrkösjärven padon laskentapoikkileikkauksen eri rakenneosien materiaalien keskimääräinen tilavuuspaino ja vesipitoisuus arvioitiin rakennustyön aikaisten tarkkailutietojen sekä myöhemmin routatutkimuksia varten otetuista näytteistä tehtyjen määritulosten perusteella.

Kyrkösjärven padon työnaikaisten tarkkailutulosten mukaan moreenin kuivatilavuus-painon keskiarvo oli 19,16 kN/m^3 ja keskihajonta oli 0,90 kN/m^3 . Moreenin vesipitoisuuden keskiarvo 9,6 % ja keskihajonta 2,14 % (Loukola 1985).

Kyrkösjärven moreenin maksimikuivatilavuuspainoksi määritettiin parannetulla Proctor-kokeella 20,6 kN/m^3 ja optimivesipitoisuudeksi 6,5 % niillä näytteillä, joista määritettiin lämpötekniset ominaisuudet.

Roudan syvyys laskettiin useilla tilavuuspainon ja vesipitoisuuden arvoilla, koska itse patorakenteessa em. ominaisuudet vaihtelevat (taulukko 23).

Patomateriaalien tilavuuslämpökapasiteetti sulana ja jäätyneenä sekä sen jäätymislämpö (olomuodonmuutoslämpö) arvioitiin kohdassa 4.3 esitetyillä kaavoilla (18) - (20).

Patomateriaalien lämmönjohtavuus sulana ja jäätyneenä määritettiin eri tutkijoiden esittämillä menetelmillä seuraavilla kuivatilavuuspainoilla 16, 18, 19 ja 20 kN/m^3 ja useilla vesipitoisuuksilla (taulukot 20 - 22).

Tässä tutkimuksessa Kyrkösjärven patomoreenin lämmönjohtavuutta määritettiin myös maanäytteistä Oulun Yliopiston geoteknillisessä laboratoriossa (OY 1993). Lämmönjohtavuusmääritysten tulokset on esitetty kohdassa 8.3 taulukossa 17.

Hiekan ja soran lämmönjohtavuudet arvioitiin taulukoiden 5 ja 22 avulla.

Moreenin lämmönjohtavuuden arvoina käytettiin joko laboratoriokokeista tai Sundbergin mitoituskäyristä (taulukko 22) saatuja arvoja.

Louheen lämmönjohtavuudelle onesitetty eri lähteissä sekä suuria että pieniä arvoja, joista valittiin norjalaisten esittämä arvo, λ = 1,4 W/mK (Frost i Jord Nr.17 1976).

Turpeen ja humusmaan sekä lumen lämmönjohtavuudet arvioitiin lähteiden (Frost i Jord Nr.17 1976) ja (Sundberg 1988) perusteella.

Suulakepuristetun polystyreenin lämmönjohtavuus arvioitiin kuvan 94 mukaan .

Taulukko 20. Lämmönjohtavuus [W/mk] eri tutkijoiden laatimien käyrästöjen ja taulukoiden perusteella.
Maalaji: Siltti ja savi (Kersten, Johansen ja venäl. normit) sekä savi (Sundberg)

					Kersten		Johansen		Sundberg		venäläiset normit	
γ_d	w %	S_{ru}	w %	S_{rf}	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f
16	25,6	100	23,6	100	1,5	1,95	1,35	2,15	1,55	2,5	–	–
16	25	96	–	–	~1,5	–	1,3	–	1,52	–	1,51	1,69
16	20	78	20	85	1,4	1,8	1,25	1,9	1,43	2,28	1,34	1,51
16	15	56	15	64	1,2	1,4	1,15	1,45	1,22	1,75	1,1	1,22
16	10	39	10	42	1,0	1,0	0,95	1,05	–	–	0,87	0,93
16	5	20	5	21	~0,6	~0,65	0,65	0,65	–	–	0,58	0,64
18	18,3	100	16,9	100	1,8	2,0	1,5	2,5			~1,5	~1,8
18	15	82	15	89	1,6	1,8	1,35	2,0			1,4	1,5
18	10	55	10	59	1,35	1,4	1,25	1,5			1,05	1,22
18	5	27	5	30	0,8	0,9	0,95	0,95			0,7	0,76
19	15,8	100	14,5	100	–	–	1,65	2,15			–	–
19	15	95	–	–	–	~2,0	~1,6	2,1			–	–
19	10	63	10	69	–	~1,7	1,35	1,65			–	–
19	5	32	5	34	–	~1,2	1,0	1,0			–	–
20	13	100	12	100	–	2,2	1,75	2,15			–	–
20	10	77	10	84	–	1,95	1,65	1,9			1,28	1,40
20	5	38	5	42	–	1,4	1,25	1,25			–	–

Taulukko 21. Lämmönjohtavuus [W/mK] eri tutkijoiden laatimien käyrästöjen tai taulukoiden perusteella.
Maalaji: Karkea hiekka(Kersten, Johansen ja venäl. normit) sekä hiekka ja siltti(Sundberg)

					Kersten		Johansen		Sundberg		venäläiset normit	
γ_d	w %	S_{ru}	w %	S_{rf}	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f
16	25,6	100	23,6	100	2,0	3,3	1,6	2,65	1,88	2,95	–	–
16	25	96	–	–	1,95	–	~1,6	–	1,85	2,9	2,50	2,73
16	20	78	20	85	1,85	2,9	1,5	2,15	1,75	2,8	2,15	2,38
16	15	56	15	64	1,75	2,25	1,4	1,65	1,50	2,2	1,80	2,04
16	10	39	10	42	1,6	1,6	1,2	1,15	1,3	1,41	1,45	1,63
16	5	20	5	21	1,3	0,85	0,95	0,75	0,8	0,75	1,05	1,1
18	18,3	100	16,9	100	2,45	3,7	1,75	2,7	2,2	3,1	2,6	2,85
18	15	82	15	89	2,3	3,5	1,7	2,5	2,0	3,05	2,27	2,62
18	10	55	10	59	2,1	2,3	1,55	1,8	1,75	2,15	1,98	2,21
18	5	27	5	30	1,7	1,3	1,25	1,1	1,35	1,3	1,45	1,51
19	15,8	100	14,5	100	~2,7	–	1,85	2,75	2,35	3,2	–	–
19	15	95	–	–	~2,6	~3,75	~1,85	–	2,3	–	–	–
19	10	63	10	69	~2,45	~2,9	1,7	2,15	2,0	2,55	2,36	2,56
19	5	32	5	34	~2,0	~1,65	1,4	1,3	1,45	1,5	1,77	1,83
20	13	100	12	100	2,95	4,0	1,95	1,8	2,55	3,3	–	–
20	10	77	10	84	2,8	3,5	1,85	2,5	2,35	3,1	2,73	2,91
20	5	38	5	42	2,25	2,0	1,6	1,4	1,7	1,7	2,09	2,15

Taulukko 22. Lämmönjohtavuus [W/mk] Sundbergin esittämien käyrästöjen perusteella (liite 9).
Maalaji: Moreeni

					Kersten		Johansen		Sundberg		venäläiset normit	
γ_d	w %	S_{ru}	w.%	S_{rf}	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f	λ_u	λ_f
16	25,6	100	23,6	100					1,65	2,35		
16	25	96	–	–					–	–		
16	20	78	20	85					1,5	2,2		
16	15	56	15	64					1,3	1,7		
16	10	39	10	42					1,0	1,06		
16	5	20	5	21					0,7	0,56		
16,5	6,5	28	6,5	30					1,0	0,8		
16,5	8,5	36	8,5	39					1,1	1,1		
18	18,3	100	16,9	100					1,85	2,48		
18	15	82	15	89					1,73	2,42		
18	10	55	10	59					~1,5	1,56		
18	5	27	5	30					1,05	0,9		
18,5	6,5	39	6,5	42					1,2	1,3		
18,5	8,5	51	8,5	55					1,4	1,55		
19	15,8	100	14,5	100					2,0	2,54		
19	15	95	–	–								
19	10	63	10	69					1,7	2,05		
19	5	32	5	34					1,2	1,07		
19,6	6,5	47	6,5	51					1,55	1,5		
19,6	8,5	62	8,5	67					1,75	1,9		
20	13	100	12	100					2,13	2,59		
20	10	77	10	84					1,95	2,4		
20	5	38	5	42					1,45	1,25		
20,6	6,5	56	6,5	61					1,8	1,80		

Taulukko 23. Laskennoissa käytettyjen patomateriaalien lämmönjohto–ominaisuuksia kuvaavia parametreja.

Maalaji	γd kN/m³	w %	λ_u W/mK	λ_f W/mK	C_u J/m³K	C_f J/m³K	L J/m³	Huom.
Moreeni	19	15	2,0 x)	2,54 x)	$2,62 \times 10^6$	$2,03 \times 10^6$	$9,5 \times 10^7$	(Sr = 100 %)
Moreeni	18,5	8,5	1,7 Lab)	2,15 Lab)	$2,09 \times 10^6$	$1,7 \times 10^6$	$5,25 \times 10^7$	(Lab = lab.määr.)
Moreeni	20	10	1,95 x)	2,4 x)	$2,34 \times 10^6$	$1,92 \times 10^6$	$6,7 \times 10^7$	(x = Sundberg)
Sora	19	5	1,45 x)	1,5 x)	$1,83 \times 10^6$	$1,63 \times 10^6$	$3,2 \times 10^7$	
Sora	19	10	2,0 x)	2,55 x)	$2,22 \times 10^6$	$1,83 \times 10^6$	$6,3 \times 10^7$	
Hiekka	19	15	2,35 x)	3,2 x)	$2,62 \times 10^6$	$2,03 \times 10^6$	$9,5 \times 10^7$	(Sr = 100 %)
Louhe	18	2	1,4	1,4	$1,59 \times 10^6$	$1,51 \times 10^6$	$1,2 \times 10^7$	(norjal.)
Turve	3,5	260	0,5 y)	1,1	$4,1 \times 10^6$	$2,2 \times 10^6$	$3,0 \times 10^8$	(y = Johansen)
Humus	~ 3	200	0,5	1,6	$2,7 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$	$2,0 \times 10^8$	
Lumi	2,5		0,2	0,2				
Suulakepu-ristettu polystyreeni	0,04	125	0,04	0,04	$2,4 \times 10^5$	$1,3 \times 10^5$	$1,67 \times 10^7$	

9 TALVIKAUSIEN SÄÄOLOSUHTEET VUOSINA 1979 - 1991

Maapatojen roudan syvyyksien säännöllinen havainnointi aloitettiin syksyllä 1979. Tätä ennen oli Uljuan Tulisaaren padolla vuosina 1970 - 73 sekä Hautaperän padolla 1976 - 79 tehty roudan syvyyshavaintoja.

Taulukossa 10 sivulla 50 on esitetty padon nimi, sijaintikunta, padon valmistumisvuosi, vesi- ja ympäristöpiiri, patotyyppi (VP= vyöhykepato ja HP= homogeeninen maapato), padon korkeusasema, pakkasmäärän laskennassa käytetty säähavaintoasema ja sen korkeus merenpinnasta.

Säähavaintoasemaksi on valittu yleensä patoa lähinnä oleva asema. Käytettyjä vuorokauden keskilämpötiloja ei ole korjattu padon korkeusasemaa vastaaviksi.

Keskilämpötilan muutos 100 metrin korkeustason muutosta kohti on noin 0,5 °C (Solantie, suullinen tieto 1994). Valitut säähavaintoasemat sijaitsevat lähes kaikki korkeammalla kuin ko. padot, joten saadut pakkasmäärät voivat olla hieman suurempia kuin olisi saatu padolla mittaamalla. Jos lasketaan marraskuun ja maaliskuun väliselle ajalle 0,5 °C:n aiheuttama pakkasmäärä, niin mahdollinen "virhe" käytetyissä pakkasmäärissä on 100 metrin korkeuserolla 1825 h°C.

Kuvassa 56a on esitetty normaalikauden 1931 - 60 lämpötilahavaintoihin perustuva vuoden keskilämpötilakartta (Kolkki 1966)

Liitteessä 7 esitetään niiltä talvilta, joina routahavaintoja on tehty kullakin padolla, maksimipakkasmäärä, pakkasmäärän toistuvuus normaalikausina 1931 - 60 ja 1961 - 90, talven alkamis- ja loppumisajankohta, talvikauden pituus ja talven voimakkuus (ankaruus). Talvikausi alkaa, kun vuorokauden keskilämpötila pysyvästi laskee 0 °C:n alapuolelle ja loppuu kun vuorokauden keskilämpötila pysyvästi nousee 0 °C:n yläpuolelle. Pakkasmäärä lasketaan samalta aikaväliltä, jonka pituus vuorokausina on talven pituus. Talven voimakkuutta voidaan arvioida, kun pakkasmäärä jaetaan talven pituudella.

Nyt käytössä olevat pakkasmääräkartat (Mäkelä & Tammirinne 1979) perustuvat normaalikauden 1931 - 60 lämpötilahavaintoihin (kuva 64).

VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratoriossa on laadittu Ilmatieteen laitoksen viimeisen ilmastotilaston 1961 - 1990 perusteella eri pakkasmäärien toistuvuuksille pakkasmääräkartat, jotka ovat alustavia, eikä niitä ole vielä julkaistu. Aiempiin karttoihin verrattuna eroa on pohjana olevien tukiasemien määrässä/tiheydessä. Jakaumana siinä on käytetty ns. Gumbelin jakaumaa, joka on normaalijakaumaa pitkähäntäisempi (VTT 1993). Normaalikauden 1961 - 1990 lämpötilahavaintoihin perustuvat pakkasmääräkartat tulisi julkaista mahdollisimman pian.

Uusi normaalikausi 1961 - 1990 oli Suomessa 0,0–1,0 astetta kylmempi kuin vanha 1931–1960; suhteellisesti kylmintä oli Lapissa (Solantie 1992). Kuvassa 56b on esitetty vuoden keskilämpötilan muutos (°C) kaudesta 1931 - 1960 kauteen 1961 - 1990.

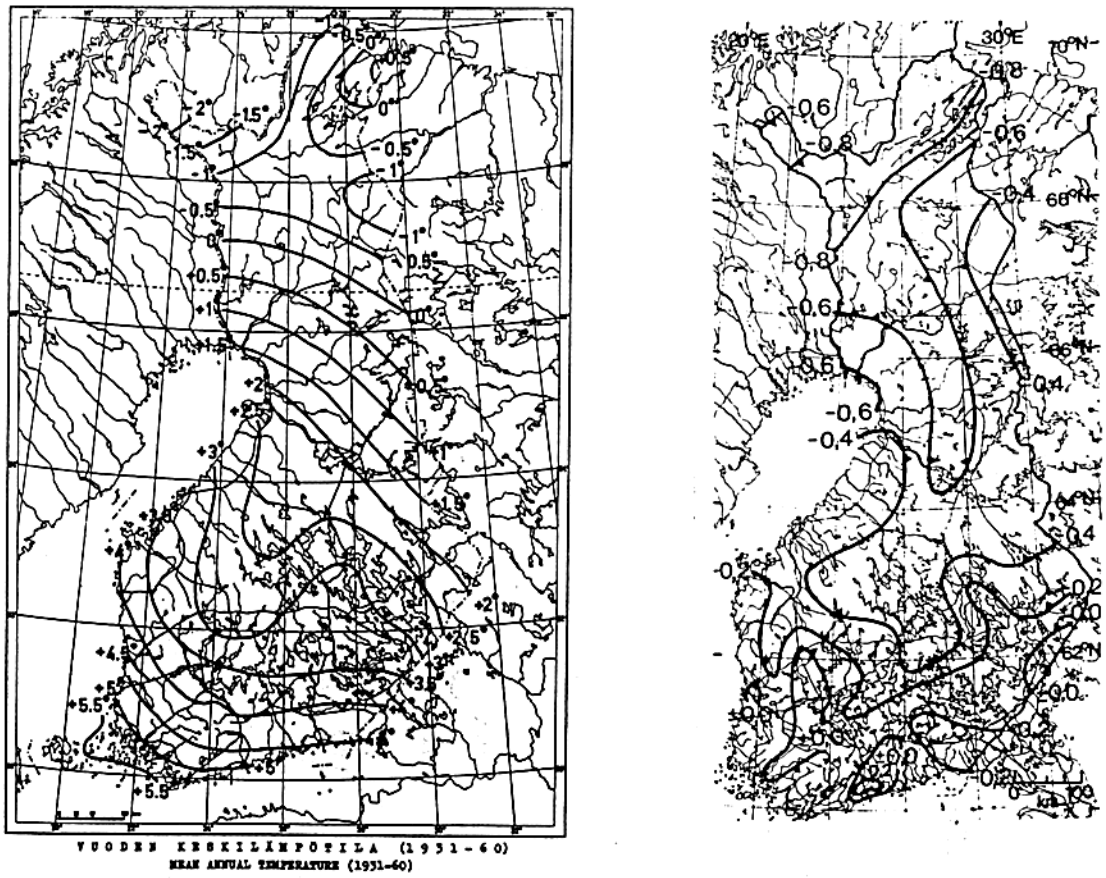
Talvet jäähtyivät eniten ja talvikuukausista joulukuu. Uutena kautena talvet olivat Pohjois-Suomessa puolestatoista kahteen astetta, Keski-Suomessa noin asteen ja Etelä-Suomessa noin puoli astetta entistä kylmempiä.

Muina vuodenaikoina poikkeamat edellisestä kaudesta olivat korkeintaan asteen suuruisia. Kesät ja syksyt jäähtyivät kaikkialla, kesät eivät kuitenkaan missään yli puolta astetta, ja kesäkuut jopa lämpenivät. Kevät oli ainoa vuodenaika, joka lämpeni suurimmassa osassa maata. Pohjois–Lapissa kuitenkin myös keväät viilenivät (Solantie 1992).

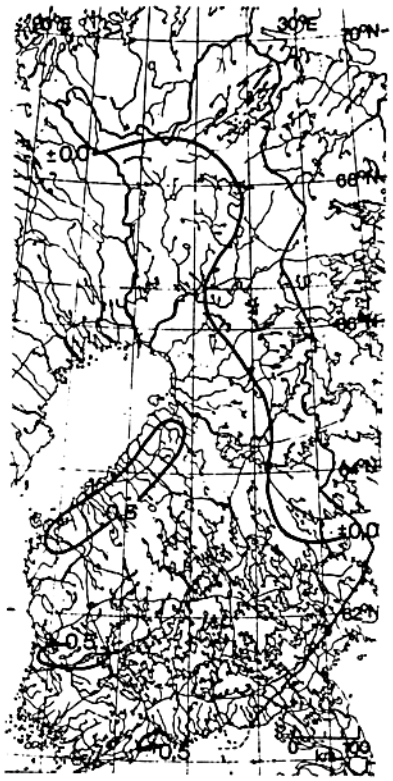
Kuvissa 57 –63 on esitetty talvikuukausien, lokakuusta huhtikuun loppuun keskilämpötilan muutos (°C) kuukausittain kaudesta 1931–1960 kauteen 1961–1990.

Yhteenvetona talvikausien sääolosuhteista vuosina 1979 – 91 voidaan todeta, että talvi 1978 – 79, jonka jälkeen Vaasan vesipiirin padoissa havaittiin routavaurioita oli pakkasmäärältään lähellä F_{10} (1931 – 1960) koko maassa. Routahavainnoinnin aikana vuosina 1984 – 1987 talvet olivat ankaria. Talven 1984 – 85 pakkasmäärä oli suuruusluokkaa F_{10} (1931 – 60) ja paikoin suurempikin. Talvi 1985 – 86 oli hieman leudompi kuin F_{10} (1931 – 60) ja talvi 1986 – 87 oli 1980–luvun ankarin, jolloin pakkasmäärä oli F_{20}(1931 – 60) luokkaa lukuunottamatta Pohjois–Suomea, jossa talvi oli hieman leudompi.

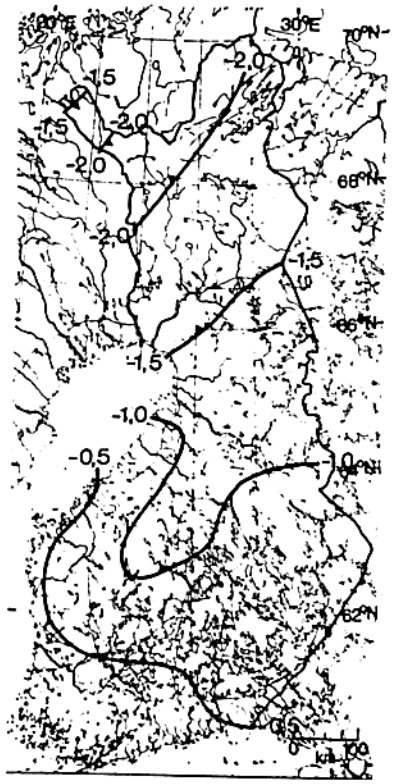
a) b)



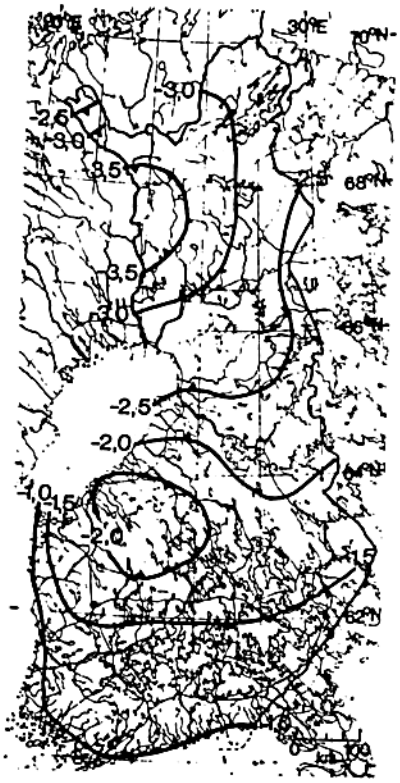
Kuva 56a. ja 56b. Vuoden keskilämpötila normaalikaudella 1931 – 60 (Kolkki 1966) ja vuoden keskilämpötilan muutos (°C) normaalikaudesta 1931 – 1960 normaalikauteen 1961 – 1990(Solantie 1992).



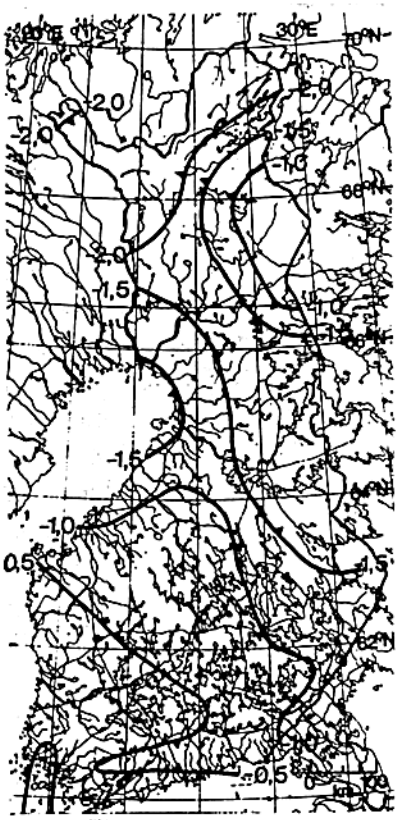
Kuva 57. Lokakuun keskilämpötilan muutos (°C) kaudesta 1931–1960 kauteen 1961–1990 (Solantie 1992).



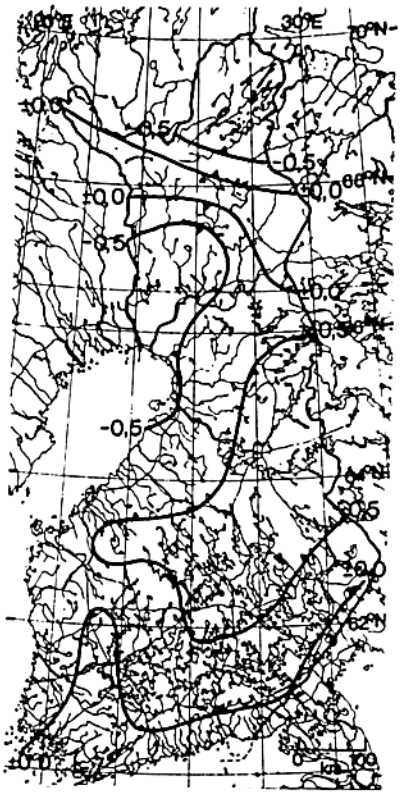
Kuva 58. Marraskuun keskilämpötilan muutos (°C) kaudesta 1931–1960 kauteen 1961–1990 (Solantie 1992).



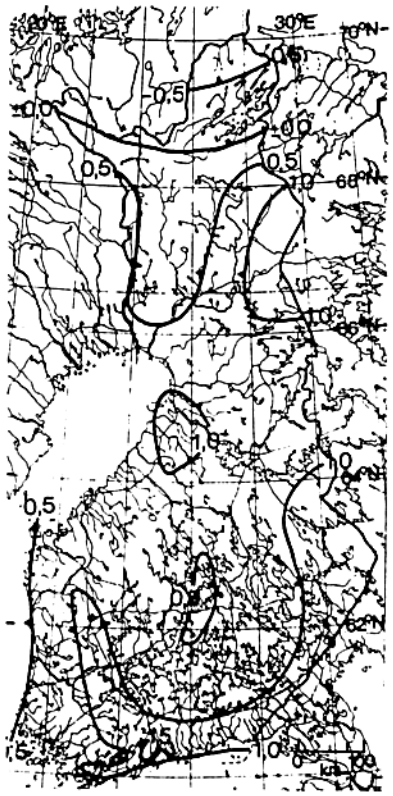
Kuva 59. Joulukuun keskilämpötilan muutos (°C) kaudesta 1931–1960 kauteen 1961–1990 (Solantie 1992).



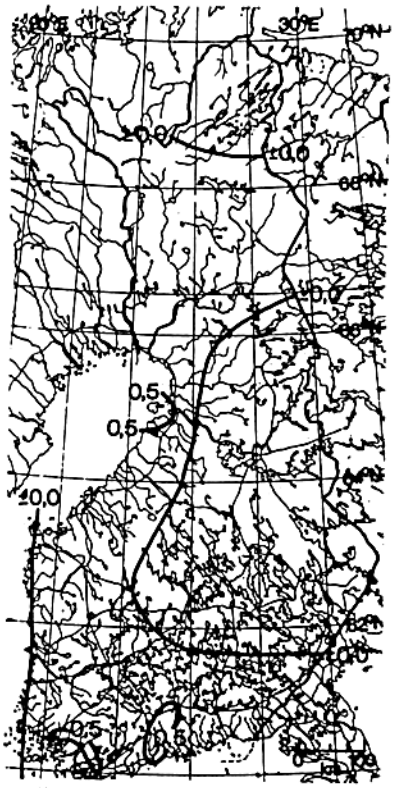
Kuva 60. Tammikuun keskilämpötilan muutos (°C) kaudesta 1931–1960 kauteen 1961–1990 (Solantie 1992).



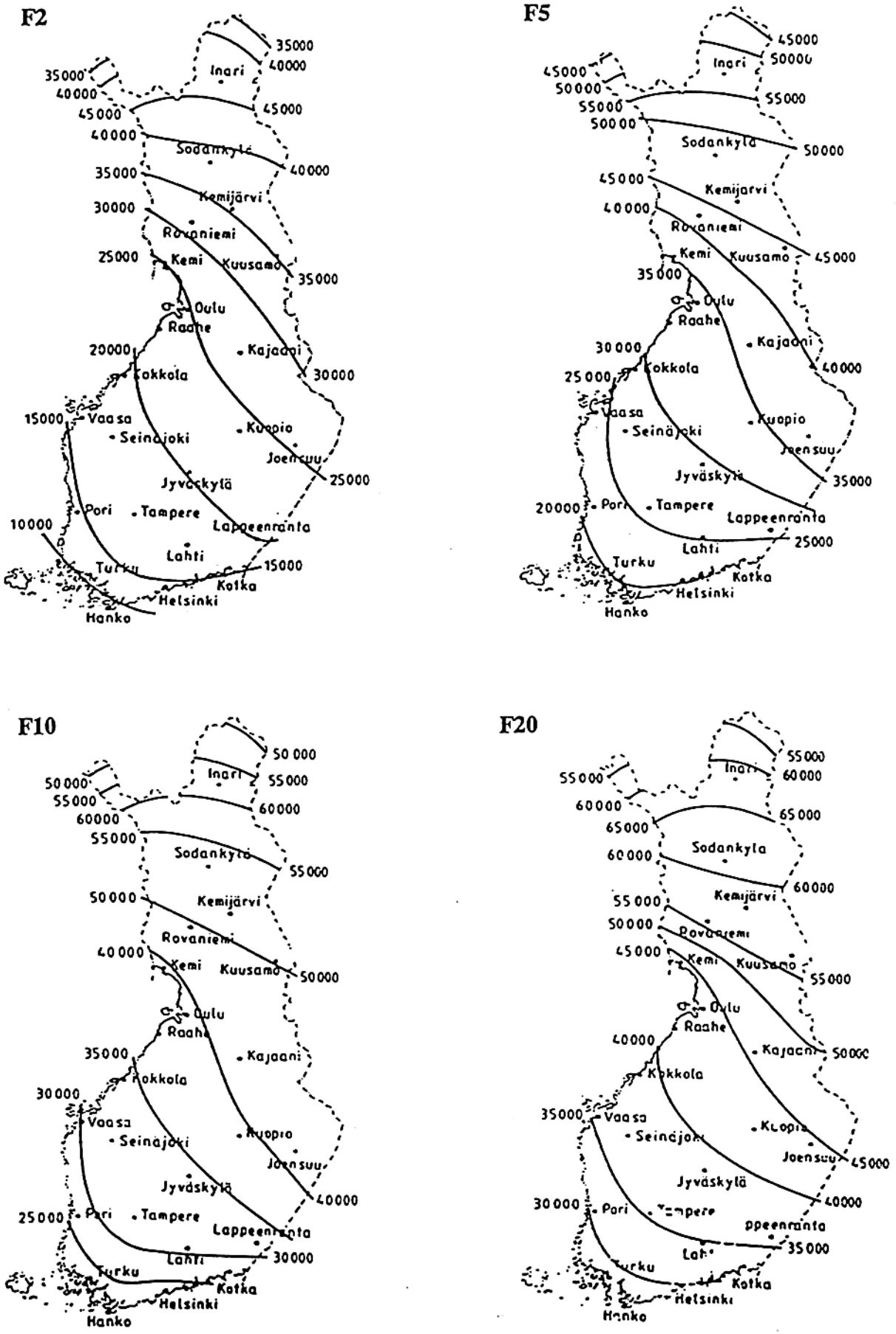
Kuva 61. Helmikuun keskilämpötilan muutos (°C) kaudesta 1931–1960 kauteen 1961–1990 (Solantie 1992).



Kuva 62. Maaliskuun keskilämpötilan muutos (°C) kaudesta 1931–1960 kauteen 1961–1990 (Solantie 1992).



Kuva 63. Huhtikuun keskilämpötilan muutos (°C) kaudesta 1931–1960 kauteen 1961–1990 (Solantie 1992).



Kuva 64. Normaalikauden 1931 – 1960 perusteella laaditut pakkasmääräkartat F_2, F_5, F_{10} ja F_{20} (Mäkelä & Tammirinne 1979).

10 ROUDAN SYVYYDEN ARVIOINTI MAAPADOSSA

10.1 Yleistä

Käytössä olevat roudan syvyyden laskentamenetelmät on yleensä kehitetty roudan syvyyden arviointiin tasaisella maapohjalla. Maapato on poikkileikkaukseltaan kapea rakenne, jolloin roudan syvyyden arviointi maapadon harjalla vaatii rakenteen muodon huomioon ottamista. Padon luiskissa on yleensä talvella lumipeite, joka toimii eristeenä. Altaan vesi vaikuttaa padon sisäosien lämpötilaan. Koska säätila vaihtelee huomattavasti talven aikana ja eri talvina, niin olosuhteiden vaikutuksen ottaminen kaikilta osin maapadon harjan roudan syvyyden arvioinnissa on vaikea tehtävä.

Roudan syvyyden arvioimiseksi yksiulotteisessa avaruudessa on kehitetty sekä empiirisiä että analyyttisiä matemaattisia menetelmiä, joista osa on ratkaistavissa vain numeerisin keinoin.

Kolmiulotteisessa tapauksessa lämpötilakentän ratkaisu on työläs ja lämpötilakenttä joudutaan ratkaisemaan numeerisin menetelmin. Differentiaaliyhtälöiden numeerisessa ratkaisussa sovelletaan erilaisia differenssi- ja finiittielementtimenetelmiä. Käsilaskentaan nämä menetelmät soveltuvat yksinkertaisissa tapauksissa pääasiassa yksiulotteisessa tapauksessa. Useampiulotteiset tapaukset vaativat numeerista ratkaisumenetelmää, käytännössä useimmiten elementtimenetelmää.

10.2 Roudan syvyyden mallintaminen roudan syvyyshavaintojen perusteella

10.2.1 Yleistä

Padon harjalla olevan routamittarin roudansyvyyshavaintojen ja pakkasmäärän välistä riippuvuutta selvitettiin määrittämällä sekä lineaarinen että ei-lineaarinen riippuvuus (SAS/STAT 1989, SAS/GRAPH 1990). Routamittareiden kohdalla padon harja oli yleensä koko talven lähes lumeton.

Lineaarisella regressioanalyysillä määritettiin roudansyvyyden ja pakkasmäärän neliöjuuren välinen riippuvuus ko. routamittarin koko havaintoaineistosta ja lisäksi ottamalla huomioon vain niiden talvien roudan syvyyshavainnot, jolloin pakkasmäärä oli yhtä suuri tai suurempi kuin F_{10} ja F_{20} . Suuressa osassa Suomea normaalikauden 1931 – 60 ilmastotilastojen mukaan talvina 1984 – 85, 1985 – 86 ja 1986 – 87 oli pakkasmäärä $F \geq F_{10(31-60)}$ ja talvina 1984 – 85 ja 1986 – 87 oli pakkasmäärä $F \geq F_{20(31-60)}$. Käsiteltävä aineisto linearisoitiin toisen muuttujan, pakkasmäärän, suhteen ottamalla pakkasmäärästä neliöjuuri. Regressiosuoran yhtälö pakkasmäärän neliöjuuren suhteen on muotoa:

$$Z = k\sqrt{F} \tag{27}$$

Yhtälö on lineaarinen √F:n suhteen ja epälineaarinen pakkasmäärän F suhteen. Yhtälö voidaan nimetä neliöjuurimalliksi.

Epälineaarista roudan syvyyden riippuvuutta pakkasmäärästä myös selvitettiin ja tällöin roudan syvyys riippui pakkasmäärästä seuraavasti:

$$Z = A_0 \, F^{A_1} \tag{28}$$

Yhtälö on epälineaarinen pakkasmäärän F suhteen ja yhtälö voidaan nimetä eksponenttimalliksi.

Yhdeksi reunaehdoksi valittiin se fysikaalinen tosiasia, että pakkaskauden alussa routaa ei vielä ole, joten yhtälöiden (27) ja (28) kuvaajat kulkevat siis origon kautta.

Liitteessä 8 on yhteenvetona esitetty patokohtaisesti sekä neliöjuurimallilla että eksponenttimallilla käsiteltyjen roudan syvyyshavaintojen regressioyhtälöiden vuorosuhdekertoimet ja valituilla pakkasmäärillä lasketut roudan syvyydet sekä samoilla pakkasmäärillä suurimmat havaitut roudan syvyydet.

10.2.2 Etelä–Suomi

Raision tekojärven (Hauninen), Maarian ja Silvolan padot sijaitsevat Etelä–Suomen rannikkoalueella, jossa vuoden keskilämpötila (Kolkki 1966) on +4,5 – +5,0 °C ja mitoituspakkasmäärät pakkasmääräkarttojen ja –taulukoiden (Mäkelä ym. 1979 ja 1986 sekä VTT 1993) perusteella $F_{10(31-60)}$ =24 800 h °C (Turku), $F_{10(61-90)}$ = 25 000 h °C (Turku) ja $F_{10(61-90)}$ = 27 100 h °C (Helsinki) sekä $F_{20(31-60)}$ = 29 700 h °C (Turku).

Em. padoista havaintoja oli varsin vähän, joten tilastollinen tarkastelu on vain suuntaa–antava.Suppean havaintoaineiston perusteella saatiin roudan syvyyden ja pakkasmäärän neliöjuuren tai pakkasmäärän riippuvuuksille seuraavia regressioyhtälöitä:

1) Homogeeninen moreenipato (Haunisten pato)

$$Z = 1{,}05 \sqrt{F_{10(31-60)}} \tag{29}$$

tai

$$Z = 0{,}77 \, F_{10(31-60)}^{0{,}529} \tag{30}$$

2) Vyöhykepato, savisydän (Maaria)

$$Z = 0{,}95 \sqrt{F_{10(31-60)}} \tag{31}$$

tai

$$Z = 1{,}067 \, F_{10(31-60)}^{0{,}486} \tag{32}$$

3) Vyöhykepato, moreenisydän (Silvola)

$$Z = 1{,}15 \sqrt{F_{10(31-60)}} \tag{33}$$

tai

$$Z = 0{,}229\ F_{10(31-60)}^{0{,}659} \qquad (34)$$

Em. yhtälöillä päädytään roudan syvyyksiin 1,6 – 2,0 m.

Varsin suppea havaintoaineisto osoittaa jo, kun verrataan homogeenisen moreenipadon (Hauninen) ja moreenisydämisen vyöhykepadon roudan syvyyksiä, että vyöhykepadossa routa tunkeutuu syvemmälle kuin homogeenisessä padossa.

Etelä–Suomessa kuivavara voitaisiin mitoittaa yhtälöllä (35), jos kriteerinä on, ettei routa tunkeudu mitoituspakkasmäärällä HW–tason alapuolelle eikä lumen eristävää vaikutusta huomioida.

$$Z = 1{,}15\ \sqrt{F_{10(31-60)}} \qquad (35)$$

Käytännön suunnittelussa voisi suositeltava kuivavara roudansyvyyden perusteella kaikissa maapatotyypeissä olla Etelä–Suomessa vähintään 2 m.

10.2.3 Itä–Suomi

Koska Itä–Suomessa sijaitsevien Kuurnan, Kuokkastenkosken ja Puntarikosken, padoista oli routahavaintoja vain parilta vuodelta, ei niitä voitu käsitellä tilastollisesti aineiston vähäisyyden vuoksi.

10.2.4 Etelä–Pohjanmaa

Etelä–Pohjanmaalla, Vaasan vesi– ja ympäristöpiirissä, sijaitsevien patojen alueella vuoden keskilämpötila (Kolkki 1966) on +3,0 – +4,0 °C ja pakkasmäärät (Mäkelä ym. 1979 ja 1986 sekä VTT 1993) ovat Vaasassa $F_{10(31-60)}$ = 30 000 h °C , $F_{10(61-90)}$ = 33 500 h °C ja $F_{20(31-60)}$ = 35 300 h °C.

Padot ovat tyypiltään homogeenisiä moreenipatoja.

Seinäjoen ympäristössä sijaitsevien patojen roudan maksimisyvyydet lukuunottamatta Kivi– ja Levalammen patoa olivat 2,05 – 2,31 m koko havaintokautena, mutta roudansyvyyksien vaihtelussa eri padoilla eri vuosina oli suuriakin eroja johtuen lähinnä paikallisista olosuhteista.

Tilastollisessa käsittelyssä saatujen yhtälöiden vuorosuhdekertoimissa on suuriakin eroja, kuten esimerkiksi aivan lähekkäin olevien Varpulan ja Hirvijärven havaintoaineistojen tuloksena saaduista yhtälöistä nähdään. Varpulan havainnoista saatujen yhtälöiden perusteella saadaan jopa 0,4 m pienempiä roudansyvyyksiä kuin Hirvijärven aineiston perusteella.

Kalajärven ja Hirvijärven aineiston perusteella päädytään lineaarisen regressiosuoran yhtälöön

$$Z = 1{,}19\ \sqrt{F_{20(31-60)}} \qquad (36)$$

Käytännön mitoituksessa Etelä–Pohjanmaalla homogeenisen moreenipadon kuivavara voitaisiin määrittää joko yhtälöllä

$$Z = 1{,}2 \sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{37}$$

tai yhtälöllä

$$Z = 0{,}476\ F_{20(31-60)}^{0{,}589} \tag{38}$$

joka antaa suurilla pakkasmäärillä hieman suurempia ja pienillä pakkasmäärillä pienempiä roudansyvyyksiä kuin neliöjuurimalli. Em. yhtälöiden perusteella päädytään noin 2,3 metrin kuivavaraan.

Kuvissa 56 – 58 on esimerkkinä esitetty Kalajärven padon routamittarin 6 roudan syvyyden ja pakkasmäärän neliöjuuren ja kuvissa 59 – 61 roudan syvyyden ja pakkasmäärän vuorosuhdetta kuvaavia regressiokäyriä eri havaintojaksojen aineistoista.

10.2.5 Keski–Pohjanmaa

Kokkolan vesi– ja ympäristöpiirin alueella keskilämpötila (Kolkki 1966) on +2,5 – +3,0 °C ja pakkasmäärät (Mäkelä ym. 1979 ja 1986 sekä VTT 1993) ovat Kokkolassa $F_{10(31-60)}$ = 35 000 h °C, $F_{10(61-90)}$ = 37 500 h °C ja $F_{20(31-60)}$= 40 000 h °C.

Hautaperän, Kaitforsin, Patanan ja Venetjoen roudan syvyyshavaintojen perusteella oli neliöjuurimallin vuorosuhdekerroin k = 1,19 – 1,26.

Padot ovat tyypiltään homogeenisiä moreenipatoja.

Käytännön mitoituksessa em. vuorosuhdekertoimilla kuivavaraksi tulisi 2,3 – 2,4 metriä.

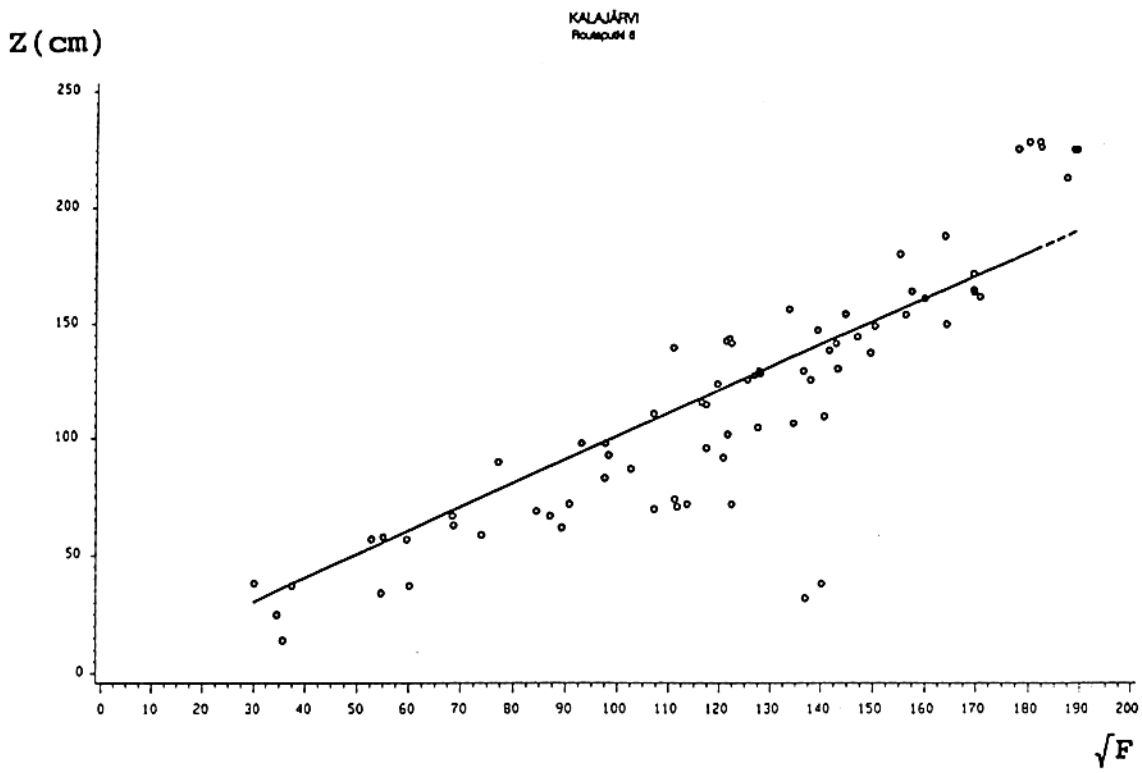
Kuivavara voitaisiin pakkasmäärän neliöjuuren suhteen mitoittaa yhtälöllä

$$Z = 1{,}2 \sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{39}$$

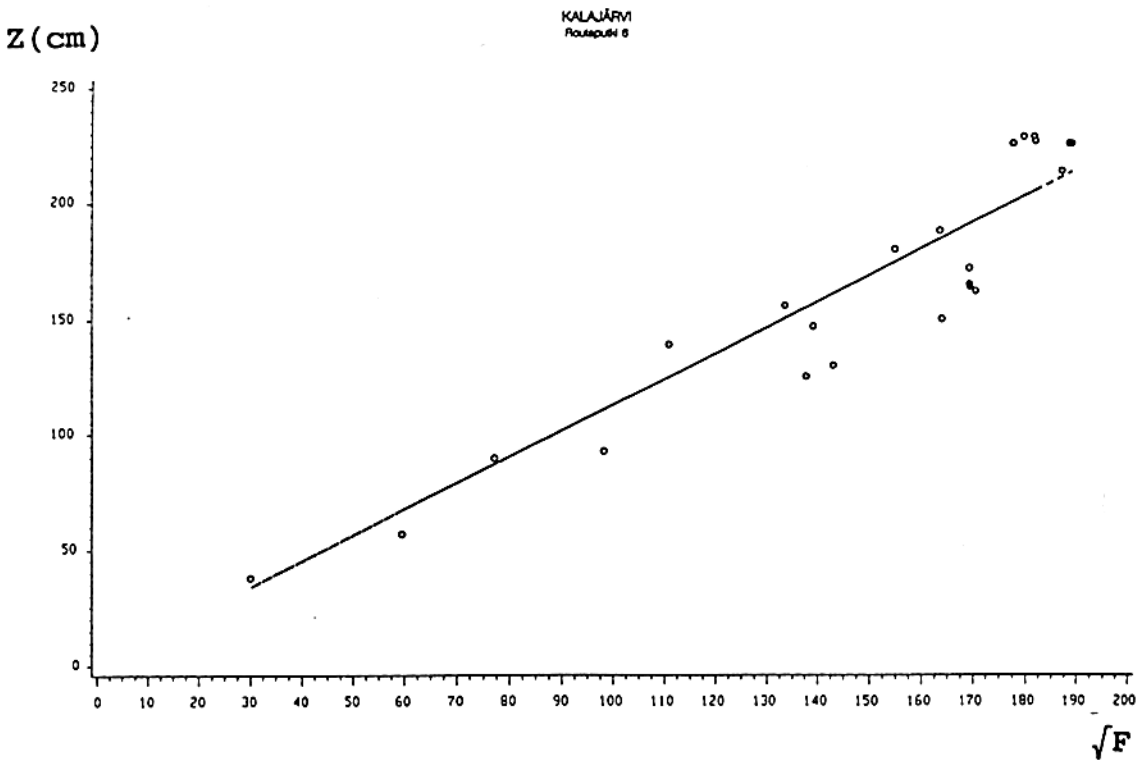
Hautaperän aineiston perusteella saadaan pakkasmäärän suhteen yhtälöksi

$$Z = 0{,}899\ F_{20(31-60)}^{0{,}527} \tag{40}$$

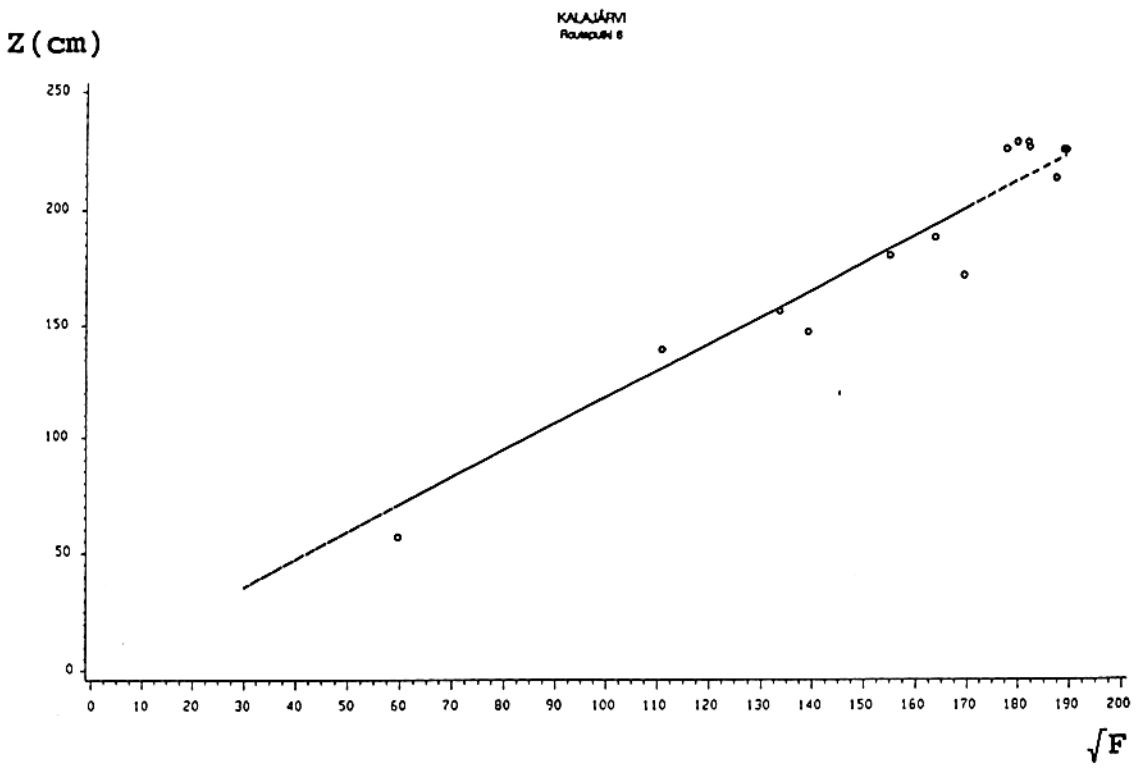
joka johtaa samoihin roudansyvyyksiin kuin neliöjuurimallissa vuorosuhdekerroin k = 1,2.



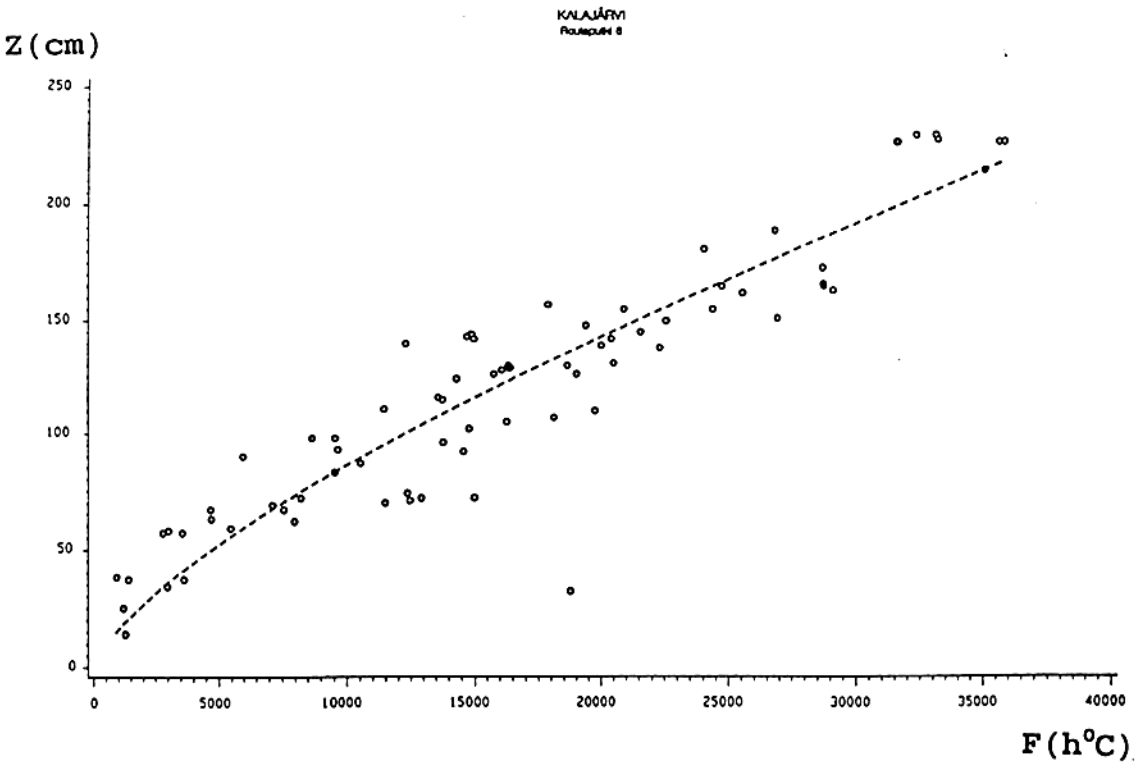
Kuva 56. Kalajärven padon routamittarin 6 koko havaintoaineiston ja neliöjuuri pakkasmäärän regressioyhtälö on Z = 1,014 √F.



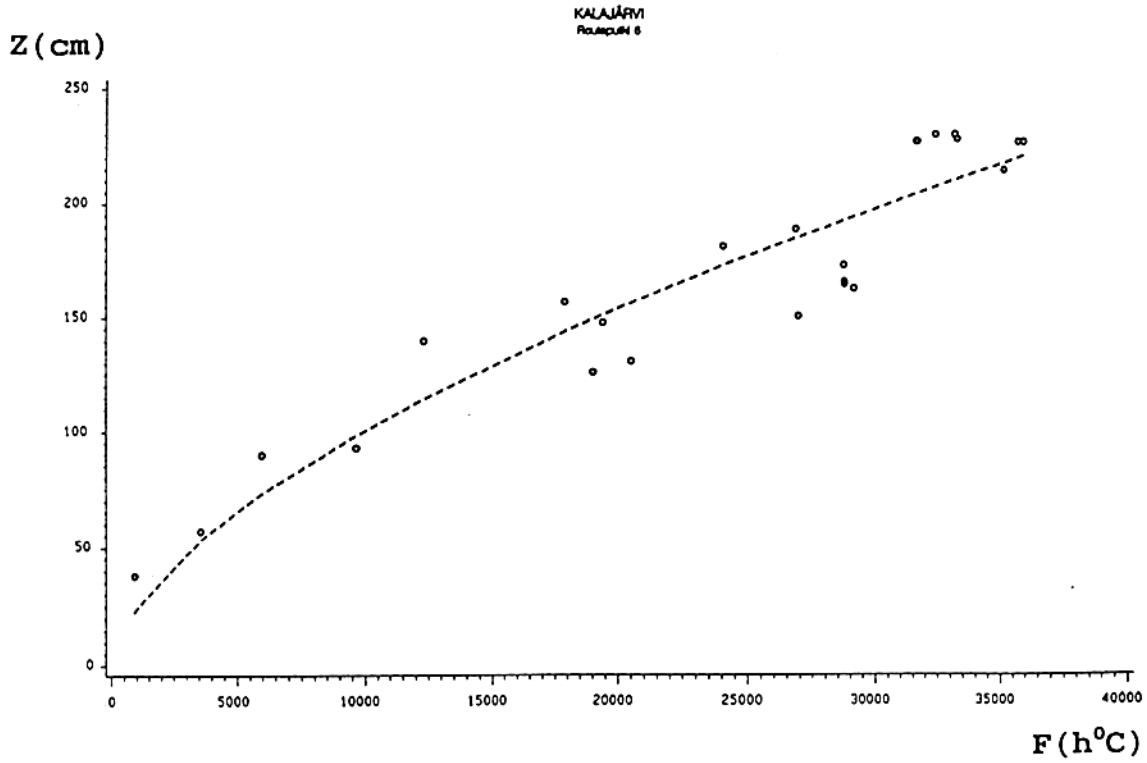
Kuva 57. Kalajärven padon routamittarin 6 ja neliöjuuri pakkasmäärän regressioyhtälö on Z = 1,133 √F , kun mukana ovat talvet, jolloin pakkasmäärä oli $F \geq F_{10(3160)}$.



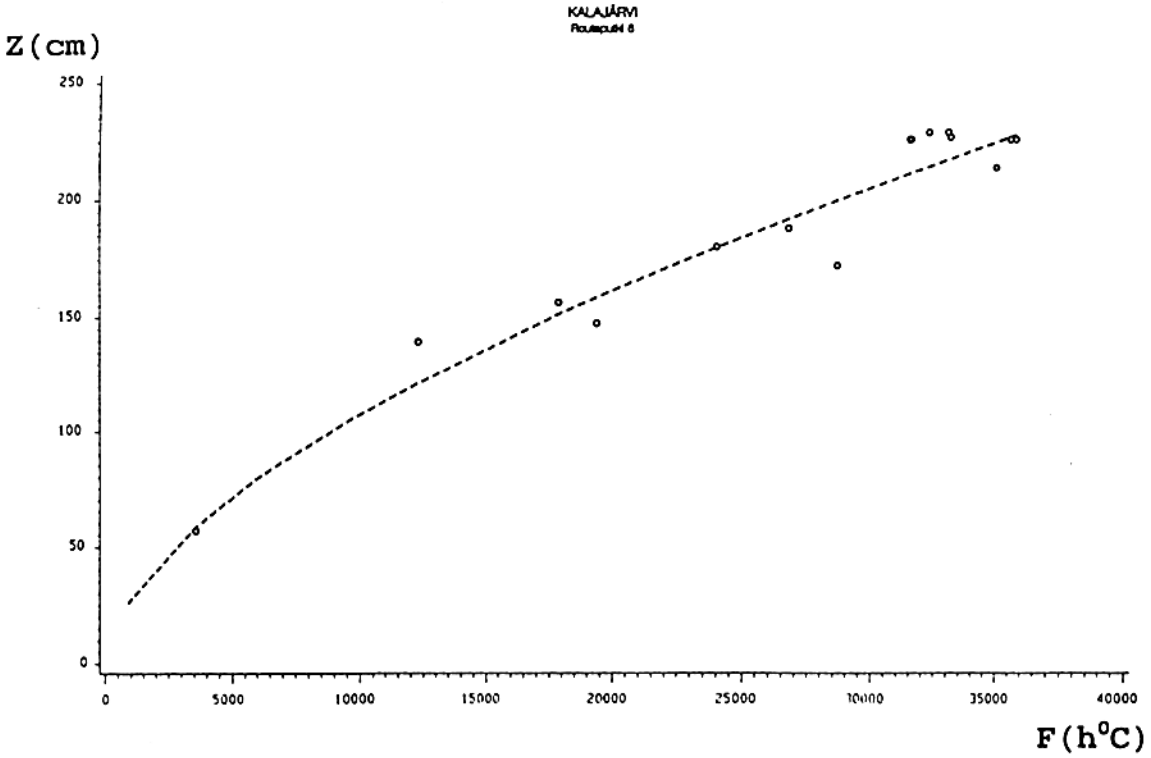
Kuva 58. Kalajärven padon routamittarin 6 ja neliöjuuri pakkasmäärän regressioyhtälö on $Z = 1{,}187\sqrt{F}$, kun mukana ovat talvet, jolloin pakkasmäärä oli $F \geq F_{20(31-60)}$.



Kuva 59. Kalajärven padon routamittarin 6 koko havaintoaineiston ja pakkasmäärän regressioyhtälö on $Z = 0{,}105\ F^{0{,}729}$.



Kuva 60. Kalajärven padon routamittarin 6 ja pakkasmäärän regressioyhtälö on $Z = 0{,}351\ F^{0{,}614}$, kun mukana ovat talvet, jolloin pakkasmäärä oli $F \geq F_{10(31-60)}$.



Kuva 61. Kalajärven padon routamittarin 6 ja pakkasmäärän regressioyhtälö on $Z = 0{,}476\ F^{0{,}589}$, kun mukana ovat talvet, jolloin pakkasmäärä oli $F \geq F_{20(31-60)}$.

10.2.6 Pohjois–Pohjanmaa

Uljuan padon sijaintialueella vuoden keskilämpötila (Kolkki 1966) on +2,0 – +2,5 °C ja pakkasmäärät (Mäkelä ym. 1979 ja 1986 sekä VTT 1993) ovat Vaalan sääh-avaintoasemalla $F_{10(31-60)}$ = 38 600 h °C, $F_{10(61-90)}$ = 45 000 h °C ja $F_{20(31-60)}$ = 43 900 h °C.

Tulisaaren vyöhykepadon roudan syvyyshavainnot noudattivat pakkasmäärän neliöjuuren suhteen yhtälöä

$$Z = 1{,}32 \sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{41}$$

ja pakkasmäärän suhteen

$$Z = 5{,}134 \, F_{20(31-60)}^{0{,}368} \tag{42}$$

Homogeeniselle moreenipadolle saatiin vastaavasti

$$Z = 1{,}06 \sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{43}$$

$$Z = 1{,}093 \, F_{20(31-60)}^{0{,}497} \tag{44}$$

Talvikautena 1990 – 91 Uljuan altaan vesipinta oli tasolla +74,00 eli noin 5 metriä kesän ja syksyn sekä alkutalven normaalia vesipintaa alempana, ja siten padon harjaosa pääsi kuivumaan normaalia käyttötilannetta enemmän. Talven 1990 – 91 pakkasmäärä oli noin 30000 h°C, mikä vastasi pakkasmäärää $F_{5(31-60)}$ ja $F_{2(61-90)}$. Tulisaaren vyöhykepadon suurin roudan syvyys oli 2,25 m ja Tulisaaren homogeenisen padon suurin roudan syvyys oli 2,34. Arkkusaaren homogeenisen padon suurin roudan syvyys oli vain 1,57 m, mutta padon harjalla oli lunta noin 0,20 m.

Uljuan homogeenisten moreenipatojen harjalla on ollut useimmiten hieman lunta, mikä osaltaan selittää neliöjuurimallin pientä vuorosuhdekertoimen k arvoa. Alkutalven vesipinnan korkeudella altaassa on lumen lisäksi vaikutusta roudan syvyyteen.

Käytännössä voidaan Pohjois–Pohjanmaalla arvioida roudan syvyyden vaatimaa kuivavaraa homogeeniselle moreenipadolle joko yhtälöllä

$$Z = 1{,}2 \sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{45}$$

tai

$$Z = 1{,}093 \, F_{20(31-60)}^{0{,}497} \tag{46}$$

Vyöhykepadolle, jonka tiivistesydän on moreenia, suurinta roudan syvyyttä voidaan arvioida yhtälöllä

$$Z = 1{,}3 \sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{47}$$

tai

$$Z = 5{,}134 \, F_{20(31-60)}^{0{,}368} \tag{48}$$

10.2.7 Lappi

Petäjäskosken pato sijaitsee lähellä Rovaniemeä, jossa vuoden keskilämpötila (Kolkki 1966) on + 0.5 °C – +1.0 °C ja pakkasmäärät (Mäkelä ym. 1979 ja 1985) ovat Rovaniemen lentokentällä $F_{5(31-60)}$ = 44 000 h °C, $F_{10(31-60)}$ = 50 200 h °C ja $F_{20(31-60)}$ = 56 100 h °C.

Petäjäskosken maapadosta 8 oli havaintoja talvilta 1983 – 84 ja 1984 – 85. Rovaniemen lentoaseman pakkasmäärä oli talvella 1983 – 84 noin 37 700 h °C, mikä vastaa keskimääräisen talven pakkasmäärää. Talven 1984 – 85 pakkasmäärä oli 46 500 h °C vastaten F_5–pakkasmäärää. Saman talven pakkasmääräksi saatiin padolla tehtyjen lämpötilahavaintojen perusteella noin 55 100 h °C. Näiden kahden havaintotalven perusteella vyöhykepadon, jossa on moreenisydän, roudan syvyyttä voidaan arvioida yhtälöllä

$$Z = 1{,}3\sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{49}$$

tai

$$Z = 1{,}538\ F_{20(31-60)}^{0{,}487} \tag{50}$$

Vajukosken padon sijaintialueella lähellä Sodankylää vuoden keskilämpötila (Kolkki 1966) on 0 – –0,5 °C ja pakkasmäärät (Mäkelä ym. 1979 ja 1985) ovat Sodankylässä $F_{10(31-60)}$ = 55 000 ja $F_{20(31-60)}$ = 60 000 h °C. Vajukosken padon talvien 1984 – 85 ja 1985 – 86 roudan syvyyshavaintojen perusteella saadaan

$$Z = 1{,}325\sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{51}$$

tai

$$Z = 3{,}076\ F_{20(31-60)}^{0{,}420} \tag{52}$$

10.2.8 Yhteenveto regressiomallien käytöstä

Regressiomalleilla $Z = k\sqrt{F}$ (neliöjuurimalli) tai $Z = A_0F^{A1}$ (eksponenttimalli) samasta havaintoaineistosta arvioidut roudan syvyydet eroavat hieman toisistaan. Eksponenttimallilla saadaan pienillä pakkasmäärillä suurempia ja suurilla pakkasmäärillä pienempiä roudan syvyyksiä kuin neliöjuurimallilla.

Liitteestä 8 käy ilmi, että jopa saman padon eri havaintopoikkileikkauksista mitatuista roudan syvyyksistä lasketut vuorosuhdekertoimen k arvot pakkasmäärän neliöjuuren suhteen poikkeavat suurestikin toisistaan. Erot johtuvat lähinnä patomateriaalien kuivatilavuuspainon, vesipitoisuuden, rakeisuuden, kapillaarisuuden, mineraalikoostumuksen ja lämmönjohtavuuden vaihteluista sekä paikallisista olosuhdevaihteluista kuten lumipeitteestä, jonka pysyvyyteen vaikuttaa vallitseva tuulen suunta patoalueella.

Maapatojen harjan roudan syvyys voidaan arvioida neliöjuurimallin yhtälöllä $Z = k\sqrt{F}$, jos harja rakennetaan luonnon materiaaleista eikä tiedossa ole tarkempien menetelmien vaatimia materiaalien lämmönjohtavuuden arvoja.

Homogeenisen moreenipadon roudan syvyys voidaan määrittää koko Suomen alueella kaavalla (53) tai (54)

$$Z = 1{,}2\sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{53}$$

tai

$$Z = 1{,}2\sqrt{F_{10(61-90)}} \tag{54}$$

Vyöhykepadon roudan syvyys , kun tiivistesydän on moreenia, voidaan määrittää kaavalla (55) tai (56)

$$Z = 1{,}3\sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{55}$$

tai

$$Z = 1{,}3\sqrt{F_{10(61-90)}} \tag{56}$$

Vyöhykepadon roudan syvyys, kun tiivistesydän on savea, voidaan määrittää kaavalla (57) tai (58)

$$Z = 1{,}05\sqrt{F_{20(31-60)}} \tag{57}$$

tai

$$Z = 1{,}05\sqrt{F_{10(61-90)}} \tag{58}$$

Käytettävissä olevien tietojen perusteella (Mäkelä ym. 1979 ja 1986 sekä Saarelainen 1993) useimmilla paikkakunnilla normaalikauden 1931–60 pakkasmäärä F_{20} vastaa likimain normaalikauden 1961–90 pakkasmäärää F_{10}.

Taulukossa 24 esitetään em. neliöjuurimallin kaavoilla (53), (55) ja (57) saadut roudan syvyydet pakkasmäärillä F_{20}, jonka suuruus eri paikkakunnilla esitetään kuvassa 64 sivulla 11.

Taulukko 24. Roudan syvyys neliöjuurimallin kaavoilla homogeenisessä maapadossa ja vyöhykepadoissa pakkasmäärillä F_{20}.

Pakkasmäärä	Roudansyvyys (m)		
F_{20} (h °C)	$Z= 1{,}05\sqrt{F_{20}}$	$Z= 1{,}2\sqrt{F_{20}}$	$Z= 1{,}3\sqrt{F_{20}}$
25000	1,66	1,90	2,06
30000	1,82	2,08	2,25
35000	1,97	2,25	2,44
40000	2,10	2,40	2,76
45000	2,23	2,55	2,76
50000	2,35	2,68	2,90
55000	2,46	2,81	3,04
60000	2,57	2,94	3,18
65000	2,68	3,06	3,31

Edellä esitetyillä kaavoilla päädytään Etelä–Suomessa ainakin vyöhykepadolla, jonka tiivistesydän on savea, alle 2 metrin kuivavaraan, joka vähäisten roudan syvyysha-vaintojen mukaan riittäisi.

Patorakenteille asetetuista yleisistä vaatimuksista johtuen ei kuivavaraa ole syytä mitoittaa liian optimistisesti. Routahavaintojen perusteella maapadon kuivavaran minimiksi tulisi suositella vähintään 2 metriä tai kaavoilla 53 – 58 saatua roudan syvyyttä.

10.3 Roudan syvyyden likimääräinen mallintaminen kerroksellisessa rakenteessa

10.3.1 Yleistä

Homogeenisen maan roudan syvyyden arvioimiseen on olemassa useita laskentamalle- ja, jotka pohjautuvat Stefanin 1890 esittämään jään paksuuden laskemiseen kehitettyyn yhtälöön 59.

$$Z = k\sqrt{F} \tag{59}$$

Watzinger, Kindem ja Michelsen esittivät 1938 Stefanin teorian pohjalta uuden roudan syvyyden laskentamallin, jossa huomioitiin myös jäätyvän kerroksen jäähtymisestä vapautuva lämpö (Watzinger ym. 1965). Menetelmä soveltui myös kerroksellisen maarakenteen roudan syvyyden laskemiseen. Beskow (1958) on lisännyt tähän alhaalta virtaavan lämmön osuuden eli ns. maalämmön. Skaven–Haug (1972) on edelleen kehittänyt maalämmön laskemista lämpötilagradientin avulla. Roudan syvyys lasketaan yhtälöiden 60, 61, 20 ja 62 avulla.

$$F = \sum_{i=1}^{n} \Omega_i + E \tag{60}$$

F on maanpinnan pakkasmäärä, h °C
Ω pakkasvastus, h °C
E maalämpö, h °C

Watzingerin mukaan määrätään ΣΩ siten, että lasketaan pinnasta alkaen kunkin osakerroksen pakkasvastus. Kerroksen n pakkasvastus saadaan kaavalla (61)

$$\Omega_n = \frac{L_{sn} Z_n^2}{2\lambda_{fn}} + L_{sn} Z_n \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Z_i}{\lambda_{fi}}\right) \tag{61}$$

n on kerrosten määrä
L_s maan jäätymislämpö, J/m^3
Z jäätyneen kerroksen paksuus
λ_f jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK

$$L_s = (w_t - w_u)\rho_d\, l_w \tag{20}$$

$$E = KGt\lambda_u \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{Z_i}{\lambda_{fi}} \right) \tag{62}$$

K on kerroin
G lämpötilagradientti, °C/m
t aika, h
λ_u sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK

Maalämmön kerroin K saa pakkaskauden aikana arvoja 2/3 – 1. Skaven–Haug on käyttänyt K:lle keskimääräistä arvoa 0,7.

10.3.2 Lämpötilagradientin määrittäminen

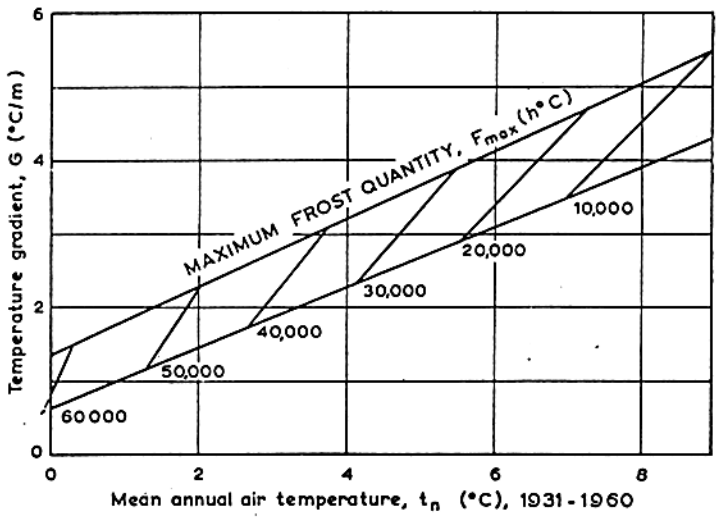
Skaven–Haug on selvittänyt lämpötilagradientin määrittämistä ilmasto–olosuhteita kuvaavien tilastotietojen pohjalta. Tätä varten hän on kerännyt mitattuja lämpötilagradienttiarvoja Pohjoismaista ja määrittänyt näistä routarajan alla pakkaskauden keskimääräisen gradienttiarvon. Tällöin hän on ottanut gradientin arvoksi välittömästi routarajan alla olevan 1,0 – 1,5 m paksun maakerroksen keskimääräisen lämpötilagradientin arvon 1. päivänä helmikuuta.

Skaven–Haugin (1972) tutkimusten mukaan lämpötilagradientin keskimääräinen arvo saadaan vuoden keskilämpötilan avulla kaavasta

$$G = 0{,}43 t_n + 1 \tag{63}$$

t_n on vuoden keskilämpötila, °C

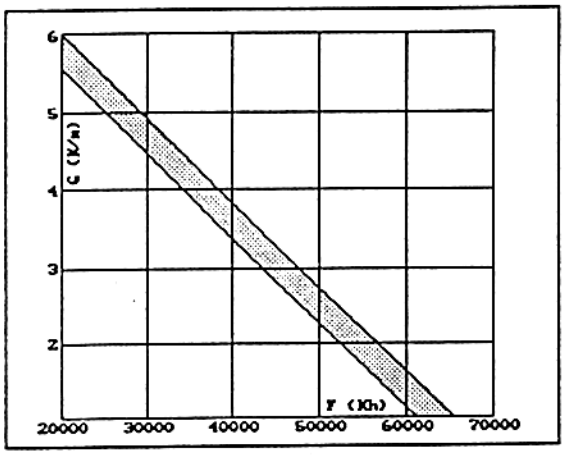
Skaven–Haug laati myös diagrammin, josta paikkakunnan keskilämpötilan ja maksimipakkasmäärän avulla saadaan lämpötilagradientti routarajan alapuolella 1. helmikuuta määritettyä (kuva 71).



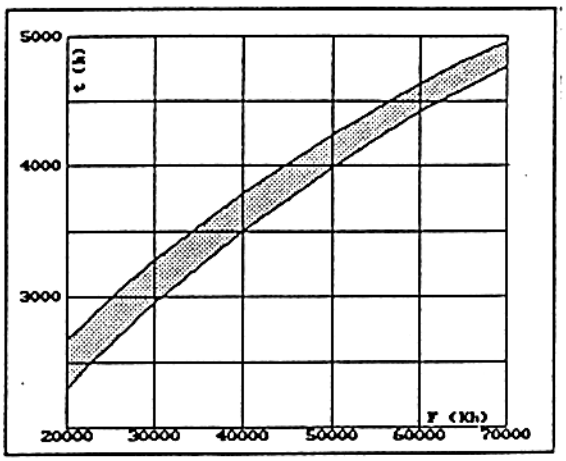
Kuva 71. Lämpötilagradientti routarajan alapuolella 1. helmikuuta määritettynä keskilämpötilan t_n ja maksimipakkasmäärän avulla. Mannerilmaston alueet sijoittuvat ylemmälle verhosuoralle. Meri–ilmaston alueet jopa alemman verhosuoran alapuolelle (Skaven–Haug 1972).

Skaven–Haugin diagrammeista on määritetty Suomen olosuhteisiin sopivilla arvoilla maan luonnollinen lämpötilagradientti (kuva 72, Aittomäki 1974).

Kuvassa 73 on esitetty pakkaskauden pituus t Suomen olosuhteissa (Aittomäki 1974).



Kuva 72. Maaperän luonnollinen lämpötilagradientti g (Aittomäki 1974).



Kuva 73. Pakkaskauden pituus t (Aittomäki 1974).

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

10.3.3 Watzingerin yhtälön PC–sovellus

Roudan syvyyttä maapadon harjalla on laskettu Watzingerin yhtälöllä, josta laskennan nopeuttamiseksi oli laadittu tietokoneohjelma PC:lle (Fulgeo Oy, käyttöohje)). Ohjelma laskee sen syvyyden, mihin asti rakenne jäätyy annetulla pakkassummalla. Kerrokset tulee asettaa siten, että jäätyminen pysähtyy johonkin annettuun kerrokseen. Siis usein on annettava arvot myös pohjamaalle esimerkiksi metrin paksuisena kerroksena.

Sulalle maalle annetaan vain yksi, keskimääräinen lämmönjohtavuuden arvo. Jos rakenteessa on myös eristekerros, on em. sulan maan lämmönjohtavuus ko. kerroksen osalla virheellinen. Eriste estää maan ominaislämmön siirtymistä jäätymispisteessä olevaan kohtaan ja jäätyminen eristeen yläpuolella on nopeampaa kuin laskelmat osoittavat. Tästä syystä lopullisen jäätymissyvyyden jäädessä lämmöneristeen yläpuolelle tulos saattaa olla harhaanjohtava. Jos lopullinen jäätymissyvyys on eristeen alapuolella ei em. vääristymä enää ole merkittävä.

Laskenta perustuu Watzingerin yhtälön muunnelmaan seuraavasti

$$F = \sum_{i=1}^{n}\left(L_{sn}Z_n\left(R_p+\frac{Z_1}{\lambda_{f1}}+\frac{Z_2}{\lambda_{f2}}+\ldots+\frac{Z_{n-1}}{\lambda_{fn-1}}+\frac{Z_n}{2\lambda_{fn}}\right)\right)+0{,}7\lambda_u Gt\left(R_p+\frac{Z_1}{\lambda_{f1}}+\frac{Z_2}{\lambda_{f2}}+\ldots+\frac{Z_{n-1}}{\lambda_{fn-1}}\right) \quad (64)$$

jossa

F	on pakkasmäärä (Kh)
L_{sn}	kerroksen n jäätymislämpö (Wh/m^3), joka lasketaan kaavalla: tilavuuspaino (kN/m^3) * vesipitoisuus * 93 (Wh/kN)
Z_n	kerroksen n paksuus (m)
R_p	pintavastus (Km^2/W)
λ_{fn}	kerroksen n lämmönjohtavuus jäätyneenä (W/Km)
λ_u	kerrosten keskimääräinen lämmönjohtavuus sulana (W/Km)
G	maaperän luonnollinen lämpötilagradientti kaavasta:
	$-0{,}0001097\ F + 7{,}95$ (vertaa kuvaa RIL 95 s. 322 kuva 183)
t	pakkaskauden pituus kaavasta:
	$21{,}91\ \sqrt{F} - 955{,}44$ (vertaa kuvaa RIL 95 s. 322 kuva 184)

Jäätymissyvyys Z_r on kerrospaksuuksien summa:

$$Z_r = (Z_1 + Z_2 + \ldots + Z_x) \quad (65)$$

missä Z_x on alimman, osittain jäätyneen kerroksen jäätyneen osan paksuus.

Ohjelman käyttämät pakkaskauden pituus t (h) ja maaperän luonnollinen lämpötilagradientti G (Kh) määritetään kuvien 72 ja 73 mukaisesti.

Koska ei ollut saatavissa aikaisempaa tietoa maapatorakenteen sisälämpötiloista ja niiden vaihtelusta talven aikana, asennettiin Kyrkösjärven homogeeniseen moreenipatoon keskilinjalle lämpötila-antureita usealle eri syvyydelle siten, että alin oli 7 metrin syvyydellä padon harjalta.

Liitteenä 6 on esitetty Hirvijärven, Kalajärven ja Kyrkösjärven padoista mitatut lämpötilaprofiilit.

Kyrkösjärven padossa talvesta 1983 – 84 lähtien suoritettujen mittausten mukaan lämpötilagradientti vaihteli 1,5 metriä paksussa maakerroksessa routarajan alapuolella 1. päivänä helmikuuta välillä G = 1,3 – 2,0 °C/m.

Syvemmällä patorakenteessa 4,0 – 8,0 metrin syvyydellä padon harjalta lämpötilagradientti samana ajankohtana vaihteli välillä G = 0,5 – 0,9 °C/m.

Kyrkösjärven padon sijaintialueella vuoden keskilämpötila on +3,5 °C ja maksimipakkasmäärä F_{50} = 43 000 h °C.

Skaven–Haugin kaavalla G = 0,43 t_n+1 saadaan lämpötilagradientin arvoksi G = 2,5 °C/m

Kuvasta 71 saadaan lämpötilagradientin arvoksi G = 2,8 °C/m.

Laskettaessa em. Watzingerin muunnetulla yhtälöllä maapadon harjaosan roudansyvyyttä, saadaan todennäköisesti liian pieniä roudansyvyyksiä, koska maan lämpötilagradientille käytetään suurempia arvoja kuin on saatu havaintojen perusteella. Skaven-Haugin määrittämät lämpötilagradientin arvot on saatu mm. maantie- ja rautatierakenteissa tehdyistä lämpötilamittauksista. Maapadon harjaosa eroaa ainakin sillä tie- tai ratapenkereestä, että padon läpi koko talven suotautuva vesi vaikuttaa huomattavasti rakenteen lämpösuhteisiin.

Taulukossa 25 on esitetty Kyrkösjärven padon sisälämpötiloja pakkaskauden alussa. Lämpötilat ovat termoelementtipisteen 8 mittaustuloksia padon keskilinjalta eri syvyyksiltä.

Taulukko 25. Kyrkösjärven padon Pl 57+00 sisälämpötiloja pakkaskauden alussa.

Ajankohta pvm.	Lämpötila (^{0}C) padossa eri syvyyksillä 2 m	4 m	7 m
15.11.1983	7	9	10
23.11.1984	5	8	9
22.11.1985	5	7	8
10.10.1986	9	10	9
13.11.1987	6	7	7
3.12.1990	6	8	9
25.11.1991	6	7	8

10.3.4 Suoritetut laskennat

Watzingerin yhtälön laskentaohjelman lähtöarvoina annetaan maakerroksittain kerroksen paksuus (m), lämmönjohtavuus jäätyneenä λ_f (W/Km), kosteus (p-%), kuivatilavuuspaino (kN/m^3). Sulalle maalle annetaan vain yksi keskimääräinen lämmönjohtavuuden arvo λ_u (W/Km). Lisäksi pintavastukselle voidaan antaa ohjelman suositusarvoina 0,00 , 0,10 , 0,20 tai 0,30 Km^2/W. Pintavastuksen avulla voitaisiin ottaa huomioon esimerkiksi lumen eristävä vaikutus, mutta havaintojen mukaan padon harja pysyy yleensä lumettomana.

Ohjelmalla laskettiin roudan syvyyksiä Kyrkösjärven padon harjaosassa sekä ennen korotusta että sen jälkeen. Lisäksi laskettiin myös muita rakennevaihtoehtoja mukaan luettuna erilaisia routaeristeratkaisuja. Laskentatuloksia verrattiin havaintokauden ankarimpien talvien 1984–85 ja 1986–87 havaintotuloksiin. Kuvissa 74 – 77 on esitetty Kyrkösjärven padon routahavainnot em. talvina sekä Watzingerin kaavalla saadut roudansyvyydet (x) pakkasmäärillä 10000 h^{0}C, 20000 h^{0}C, 30000 h^{0}C ja talven maksimipakkasmäärällä.

Laskettu roudan syvyys padon harjan keskilinjalla vastasi molempina em. talvina hyvin poikkileikkauksessa Pl 50+75 olevan routamittarin 6 havaintoja, mutta poikkileikkauksessa Pl 57+00 padon harjalla olevan routamittarin roudan maksimisyvyys oli noin 0,3 – 0,5 m pienempi kuin laskettu arvo.

Esimerkkinä laskettiin Kyrkösjärven padon korotuksen jälkeistä tilannetta, jossa harjalla on noin 1 metri soraa moreenitiivisteosan päällä (taulukko 26). Laskennassa moreenille käytettiin eri tapauksissa sekä laboratoriossa määritettyjä (OY 1993) että Sundbergin käyristä saatuja lämmönjohtavuuden arvoja ja harjasoralle Sundbergin käyristä (Sundberg 1988) saatuja arvoja. Roudan syvyys on laskettu homogeenisen moreenipadon harjan keskilinjalla.

Taulukossa 26 on esitetty Watzingerin menetelmällä ja neliöjuurimallin yhtälöllä $Z = 1{,}2\sqrt{F}$ saadut sekä mitatut eri pakkasmääriä vastaavat Kyrkösjärven padon Pl 50+75 routamittarin 6 (RM 6), Kalajärven padon poikkileikkauksen Pl 5+48 routamittarin 4 (RM 4) ja Hautaperän padon Pl 8+40 routamittarin 2 (RM 2) harjan roudan syvyydet. Kyrkösjärven padon harjalla on soraa 1,0 m, Kalajärven padon harjalla 0,9 m ja Hautaperän padon harjalla 0,85 m. Tiivistemateriaali on silttistä hiekkamoreenia kaikissa em. padoissa. Harjan rakenteen perusteella pitäisi roudan syvyyksien olla näissä padoissa samaa luokkaa.

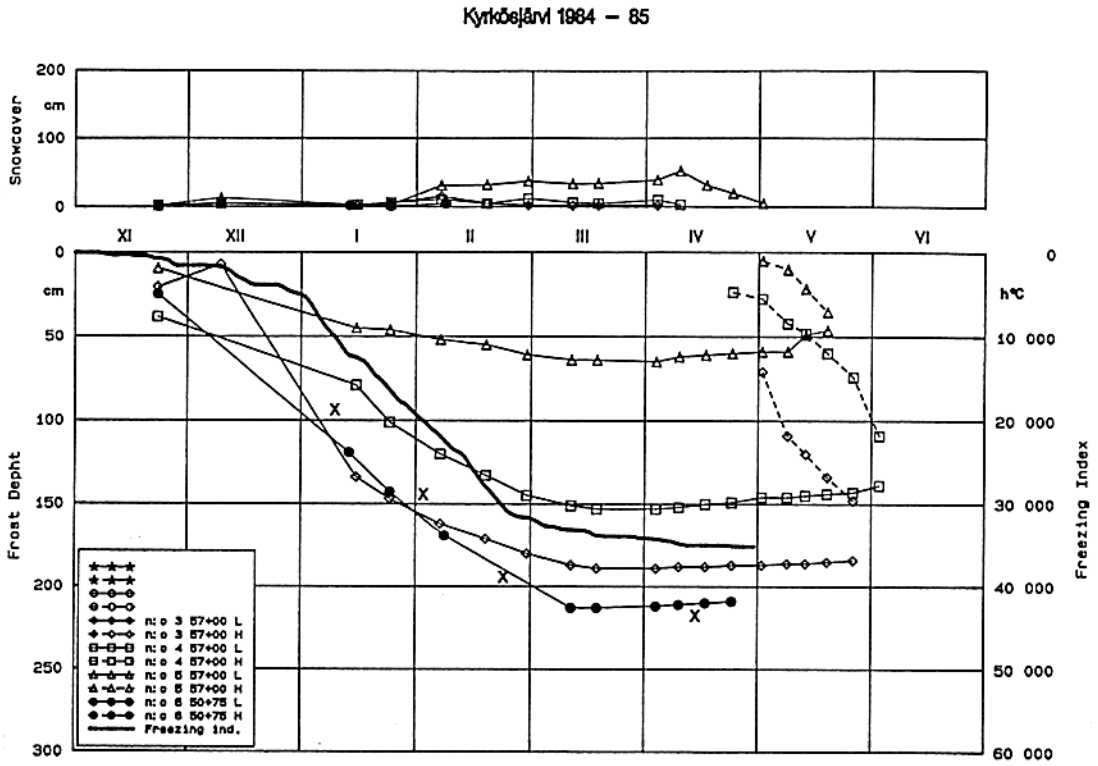
Taulukko 26. Watzingerin yhtälöllä ja yhtälöllä $Z = 1{,}2\sqrt{F}$ laskettuja roudan syvyyksiä sekä mitattuja roudan maksimisyvyyksiä eri pakkasmäärillä Kyrkösjärven, Kalajärven ja Hautaperän padon harjalla.

Pakkas- määrä (h^0C)	Laskettu roudansyvyys (m) Watzingerin yhtälö λ_{lab}	 $\lambda_{SUNDBERG}$	 Yhtälö $1{,}2 \times \sqrt{F}$	Mitattu roudan syvyys (m) RM 6	 RM 4	 RM 2
10000	0,96	1,08	1,20	0,94	0,95	1,28
20000	1,44	1,60	1,70	1,63	1,68	1,60
30000	1,87	2,03	2,08	1,92	2,01	1,99
33000	–	–	–	–	2,17	–
40000	2,35	2,50	2,40	2,17	–	2,49

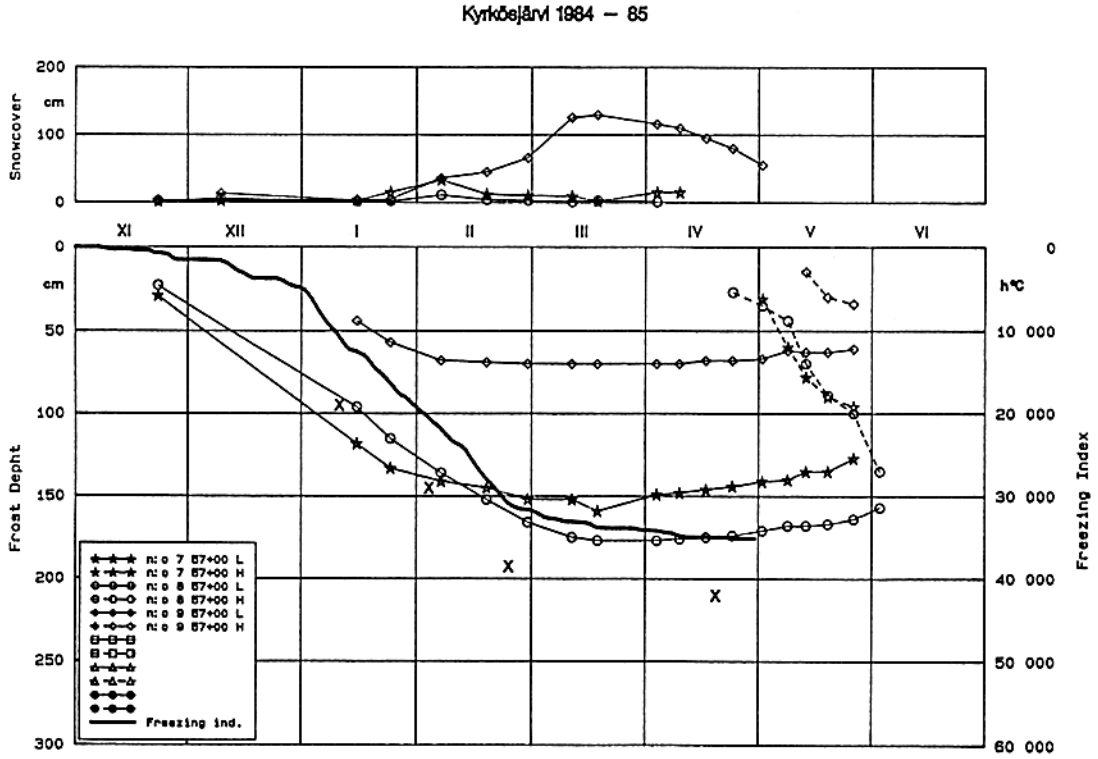
Homogeenisen moreenipadon harjan roudan syvyyden laskenta Watzingerin yhtälöllä edellyttää patomateriaalien todellisten lämmönjohtavuusarvojen ja vesipitoisuuksien oikeaan osunutta arviointia, koska olosuhteet vaihtelevat eri talvina. Laboratoriossa määritetyllä moreenin lämmönjohtavuuden arvoilla saatiin pienempiä roudan syvyyksiä kuin oli mitattu em. padoilla ja saatu neliöjuurimallin yhtälöllä. Sundbergin käyristä valituilla lämmönjohtavuuden arvoilla lasketut roudan syvyydet vastasivat hyvin mitattuja arvoja.

Vyöhykepadon roudan syvyyden laskenta Watzingerin yhtälöllä johtaa liian pieniin roudan syvyyksiin, koska tiivistesydän on kapea ja pääsee siten jäähtymään helpommin kuin homogeeninen pato.

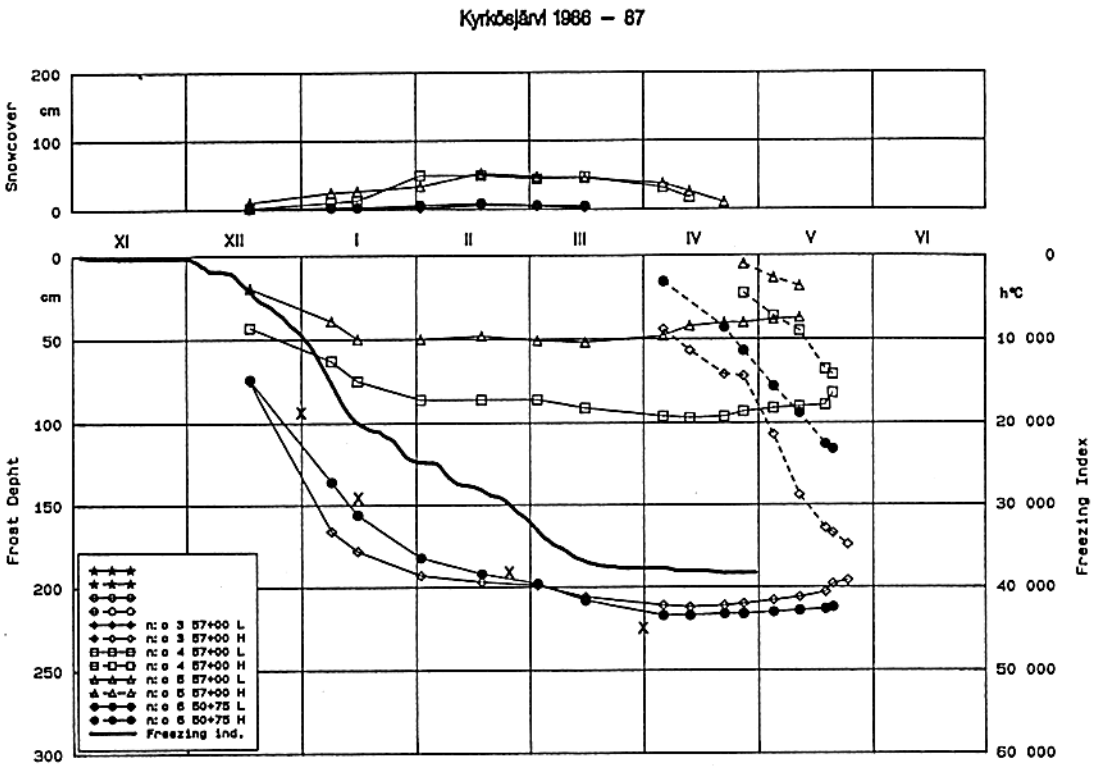
Lisäksi laskettiin Watzingerin yhtälöllä homogeenisen moreenipadon harjan routaeristeen sijainnin vaikutusta eristystehoon, kun 0,05 m:n tai 0,1 m:n paksuinen suulakepuristettu routaeristelevy oli suoraan padon harjalla, pintasoran alla moreenin pinnalla ja pintasorakerroksen keskellä (taulukko 27).



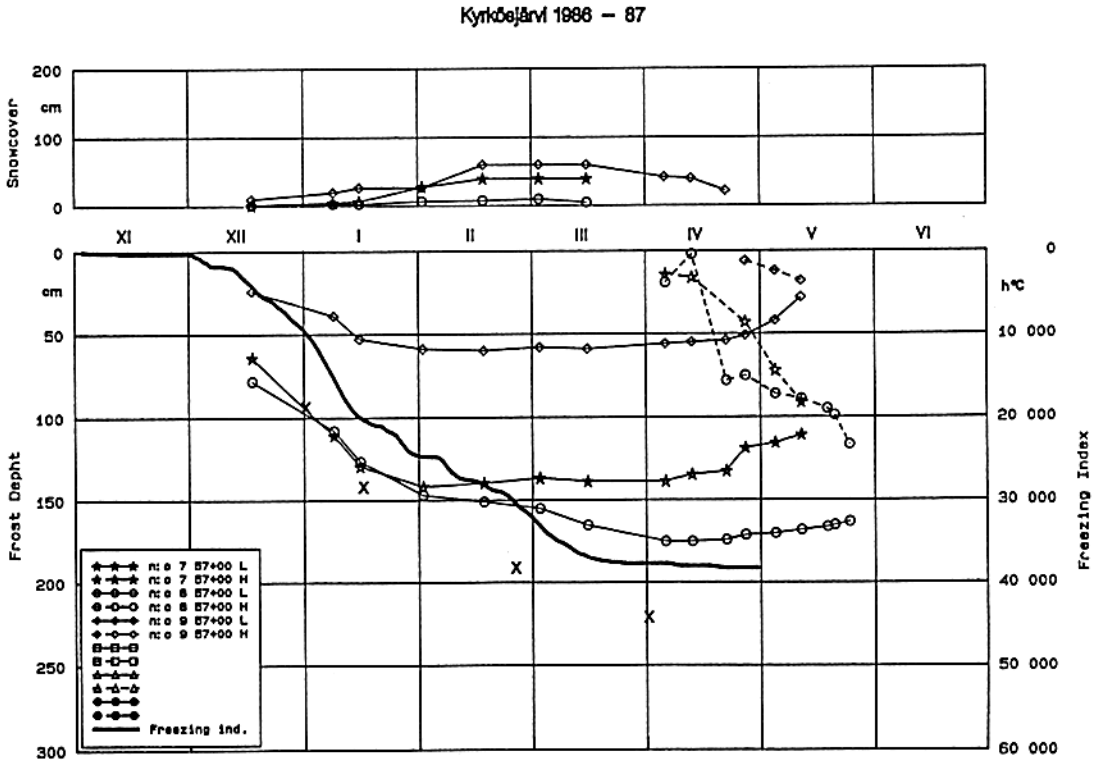
Kuva 74. Kyrkösjärven padon routahavainnot (routamittarit 3–6) talvella 1984–85 verrattuna Watzingerin kaavalla saatuihin roudan syvyyksiin(x).



Kuva 75. Kyrkösjärven padon routahavainnot (routamittarit 7–9) talvella 1984–85 verrattuna Watzingerin kaavalla saatuihin roudan syvyyksiin(x).



Kuva 76. Kyrkösjärven padon routahavainnot (routamittarit 3–6) talvella 1986–87 verrattuna Watzingerin kaavalla saatuihin roudan syvyyksiin (x).



Kuva 77. Kyrkösjärven padon routahavainnot (routamittarit 7–9) talvella 1986–87 verrattuna Watzingerin kaavalla saatuihin roudan syvyyksiin (x).

Taulukko 27. Roudansyvyys padon harjaosassa ns. muunnetulla Watzingerin kaavalla eri eristevaihtoehdoilla pakkasmäärällä F = 40000 h^{0}C.

	Roudansyvyys (m)		
Rakenne-kerrokset	Polystyreeni-eriste 0,05 m	Polystyreeni-eriste 0,1 m	Ilman eristettä
Polystyreeni Sora 0,5 m Moreeni	0,92	0,26	2,39
Harjasora 0,5 m Polystyreeni Moreeni	1,08	0,60	2,39
Harjasora 0,5 m Polystyreeni Sora 0,5 m Moreeni	1,19	0,70	2,35

Taulukossa 27 esitetyt laskennan tulokset osoittavat, että 0,05 m paksuinen polystyreeni eristelevy ei ole riittävä pakkasmäärällä F = 40000 h°C , jos padon harjalla olevan sorakerroksen paksuus on 0,5 metriä. Kun 0,05 m paksuinen eristelevy on 1 m paksuisen sorakerroksen keskellä, niin routa ulottui 0,64 m eristelevyn alapuolelle ja 0,14 m tiivistemoreeniin. Patoturvallisuusohjeiden (VYH 1991) maapadon turvavaran (tiivistysosan yläpinnan ja HW–tason erotuksen) tulee olla vähintään 0,4 m paitsi ns. vain vähäistä vaaraa vahinkotapauksessa aiheuttavissa padoissa vähintään 0,3 m. Tämän ehdon 0,05 m paksuinen polystyreenieriste täyttä, kun sorakerroksen paksuus on 1 metri. Paras eristysteho saadaan, jos eristelevy on rakenteen pinnalla, mutta tämä ei ole mahdollista, koska padon harjalla pitää pystyä ainakin kunnossapitokaluston liikkumaan rakenteita rikkomatta. Kun 0,1 m paksuinen eristelevy oli moreenin pinnalla ja levyn päällä oli 0,5 m soraa, routa ulottui levyn alapintaan. Jos 0,1 m eristelevy oli 1 m sorakerroksen keskellä, niin routa ulottui vain 0,1 m levyn alapuolelle.

Maapadon harjan roudan syvyyden laskeminen tässä tutkimuksessa käytetyllä Watzingerin yhtälön PC–sovelluksella antoi padossa mitattua pienemmän roudan syvyyden, koska ohjelmassa oli käytetty lämpötilagradientin arvoa, joka oli suurempi kuin havaintojen perusteella määritetty patorakenteen lämpötilagradientti. Toisaalta tämä virhe jää usein padon harjan rakennekerrosten vesipitoisuuden, tilavuuspainon ja lämmön johtavuuden talven aikana tapahtuvan vaihtelun sisään, jota laskettaessa roudan syvyyttä Watzingerin yhtälön PC–sovelluksella ei voitu ottaa huomioon.

Yhteenvetona voitiin todeta, että puutteistaan huolimatta muunnettuun Watzingerin yhtälöön perustuvaa ohjelmaa voitiin käyttää homogeenisen padon roudan syvyyden arvioinnissa. Vyöhykepadon roudan syvyyttä ei em. yhtälöllä voida luotettavasti arvioida, koska kapeammasta tiivisteosasta aiheutuvan rakenteen nopeamman jäähtymisen vuoksi em. yhtälöllä saataisiin liian pieni roudan syvyys .Eniten ongelmia aiheuttaa maamateriaalien lämpöteknisten ominaisuuksien arviointi, koska eritutkijoiden esittämistä mitoituskäyristä saadut arvot voivat erota suurestikin toisistaan ja

riittävä määrä laboratoriomäärityksiä eri vesipitoisuuksissa ja tiiveyksissä vaatii aikaa ja tulee yleensä kalliiksi.

10.4 Numeeriset menetelmät

10.4.1 Yleistä

Roudan etenemisen arvioimiseksi maapatorakenteessa on olemassa muutamia elementtimenetelmää soveltavia tietokoneohjelmia. Elementtimenetelmässä voidaan laskennassa ottaa huomioon lämpötilajakautuma alkutilanteessa, erilaiset reunaehdot ja materiaaliominaisuudet. Laskentatulos on aina likimääräinen, jonka tarkkuus riippuu lähtötietojen tarkkuudesta ja numeerisen ratkaisun approksimointimenetelmästä. Tässä työssä päädyttiin FRACS-ohjelman käyttöön.

10.4.2 FRACS-laskentaohjelma

Tässä tutkimuksessa laskettiin Daichao Sheng'in kehittämällä FRACS-finiittielementtiohjelmalla (Sheng 1990) maapadon harjan roudan syvyyttä. Tämä elementtiohjelma on kehitetty kaksiulotteisen jäätymis- ja/tai sulamisongelman ratkaisemiseen. Ohjelmalla voidaan laskea epälineaarisia routarintaman muutoksia ja se soveltuu myös epähomogeenisille materiaaleille. Ratkaisussa on käytetty Galerkin menetelmää yhdistettynä lämmönsiirtymisyhtälöihin ja enthalpiaan.

FRACS-ohjelman käyttöohjeet ja lähtötietojen antaminen oli esitetty erillisessä manuaalissa (Sheng 1990).

Laskettaessa esimerkiksi maapatopoikkileikkausta lähtöarvoina annetaan mm. eri rakennekerrosten nurkkapisteiden koordinaatit eli tarkastuspisteiden koordinaatit, rajojen molemmat tarkastuspisteet ja rajan elementtijako, kunkin materiaalialueen alkulämpötila ja alueen tarkastuspisteet. Tämän jälkeen annetaan lämpötila-alue, jossa jäätyminen tapahtuu. Kullekin materiaalille annetaan lämmönjohtavuudet sulana ja jäätyneenä, samoin tilavuuslämpökapasiteetit sekä olomuodonmuutoslämpö eli jäätymislämpö.

Aikaerittelyssä ilmoitetaan mm. laskentajakso (alkuaika ja loppuaika) ja tulostusväli jolloin solmulämpötilat ja routarintaman sijainti tallennetaan em. ajankohtina.

Reunaehdot voidaan antaa joko lämpötiloina, lämpövirtoina tai lämpötilana ja lämmönjohtavuuskertoimen arvona reunalla. Reunaehdot voivat olla ajasta riippuvia eli laskentajakson aikana reunaehtojen arvot voivat muuttua. Kyrkösjärven padon routarintaman etenemisen laskennassa reunaehtoina on käytetty reunaehtoa, jossa padon ulkorajoille on annettu ulkolämpötila kuukauden tai viikon keskilämpötiloina. Ohjelman rajoituksena on se, ettei aika-askelia voi olla kuin 20. Altaan puolella vedenalaisella osalla reunaehtona on käytetty mitattuja altaan veden lämpötiloja.

Ohjelma tulostaa elementtiverkon nurkkapisteiden koordinaatit, solmupisteiden lämpötilat ja routarajan valittuina ajankohtina. Ohjelma suorittaa elementtiverkon generoinnin automaattisesti ja ilmoittaa tulostustiedossa elementtien ja solmupisteiden lukumäärän sekä suurimman ja pienimmän elementin pinta-alan. Elementtiverkko tulostuu kuvaruudulle eri materiaalialueet eri värisenä, mutta ohjelmalla ei saada

tulostettua elementtiverkkoa paperille. Tulostustiedostona on vain solmupisteiden numero ja koordinaatit.

Routarintaman etenemistietojen tulostamiseksi poikkileikkauskuvaan paperille on käytetty SAS-ohjelmistoa, jolla tämän tutkimuksen kaikki kuvat on tuotettu (SAS/GRAPH 1990).

FRACS-ohjelmalla voi kuvaruudulle saada tulostettua korkeintaan 20 solmupisteen lämpötilan vaihtelukäyrän ajan suhteen.

10.4.3 Suoritetut elementtilaskennat

Laskentoja tehtiin Kyrkösjärven padon poikkileikkauksessa Pl. 57+00, koska siitä oli olemassa riittävät lähtötiedot patomateriaalien ominaisarvojen ja reunaehtojen määrittämiseksi. Laskelmia tehtiin talvikausille 1984-85 ja 1986-87, jotka olivat havaintokauden ankarimpia talvia.

Yhtenä reunaehtona padon ulkoreunoilla käytettiin patoa lähinnä sijaitsevan säähavaintoaseman vuorokauden keskilämpötiloista laskettuja kuukauden tai viikon keskilämpötiloja. Altaan puoleisella, vesipinnan alapuolisella osalla reunaehtona käytettiin altaan normaalin vedenlaatutarkkailun yhteydessä mitattuja veden lämpötilan kuukausi- tai viikkokeskiarvoja.

Laskennassa käytettiin patorakenteen alkulämpötiloina syksyllä, routaantumisen alkaessa, lämpötila-antureilla mitattuja padon eri materiaaliosien sisälämpötiloja.

Laskennassa käytettiin taulukossa 23 esitettyjä patomateriaalien lämpöteknisiä ominaisuuksia kuvaavia arvoja.

Lopullisissa laskelmissa käytettiin faasimuutosvälinä +0,01...-0,01 ^{0}C.

Padon kuivassa luiskassa olevan lumikerroksen eristävä vaikutus pyrittiin ottamaan huomioon antamalla kuivan luiskan turveverhoukselle arvioitu lumen keskimääräinen lämmönjohtavuus.

Kuvassa 78 esitetään laskennassa käytetty patopoikkileikkauksen elementtiverkko ja kuvassa 79 laskennassa käytetyt padon rakenneosien materiaalinumerot.

Liitteenä 10 on esimerkki lähtötiedostosta.

Suoritettujen noin 50 laskennan tuloksena voitiin todeta, että olettamalla kuivaan luiskaan 0,3 metrin paksuinen lumikerros ja valitsemalla patomateriaalien lämpötekniset arvot "oikein", saadut roudan syvyydet patoharjan keskiosalla vastasivat varsin hyvin mitattuja roudan syvyyksiä.

Talven 1984-85 laskennat kuvasivat tilannetta ennen padon harjan korotusta ja talven 1986 -87 laskennat korotuksen jälkeen. Kuvissa 80 - 84 esitetään esimerkkinä eri lähtöarvoilla ja reunaehdoilla laskettuja roudan syvyyksiä sekä mitatut roudan ja lumen syvyydet tammikuun, helmikuun ja maaliskuun puolivälissä talvina 1984 - 85 ja 1986 - 87. Esitetyt laskennat erosivat toisistaan moreenin lämmönjohtavuuden osalta.

Laskennan tuloksena talvikaudelta 1984 – 85 saadut roudan syvyydet vastasivat parhaiten roudan syvyyshavaintoja, kun moreenin oletettiin olevan täysin veden kyllästämä ja lämmönjohtavuus arvioitiin Sundbergin käyrien perusteella (kuva 80).

Laboratoriossa määritetyillä moreenin lämmönjohtavuuden arvoilla (kuva 82) saatiin suurempia roudan syyyksiä kuin Sundbergin käyristä samoilla vesipitoisuuksilla ja tilavuuspainoilla määritetyillä lämmönjohtavuuden arvoilla (kuva 83).

Kuvassa 81 esitetään laskentojen tuloksena talvikaudelta 1986–87 vain parhaiten havaintoja vastaava tulos, jossa moreenin oletettiin olevan täysin veden kyllästämä. Em. kuvassa esitetyt havaitut roudan syvyydet ovat poikkileikkauksessa 57+00 mitattuja. Toisessa havaintopoikkileikkauksessa Pl 50+75 routa tunkeutui routamittarin 6 mittausten mukaan padon harjan keskilinjalla molempina laskentatalvina 0,25 – 0,4 metriä syvemmälle.

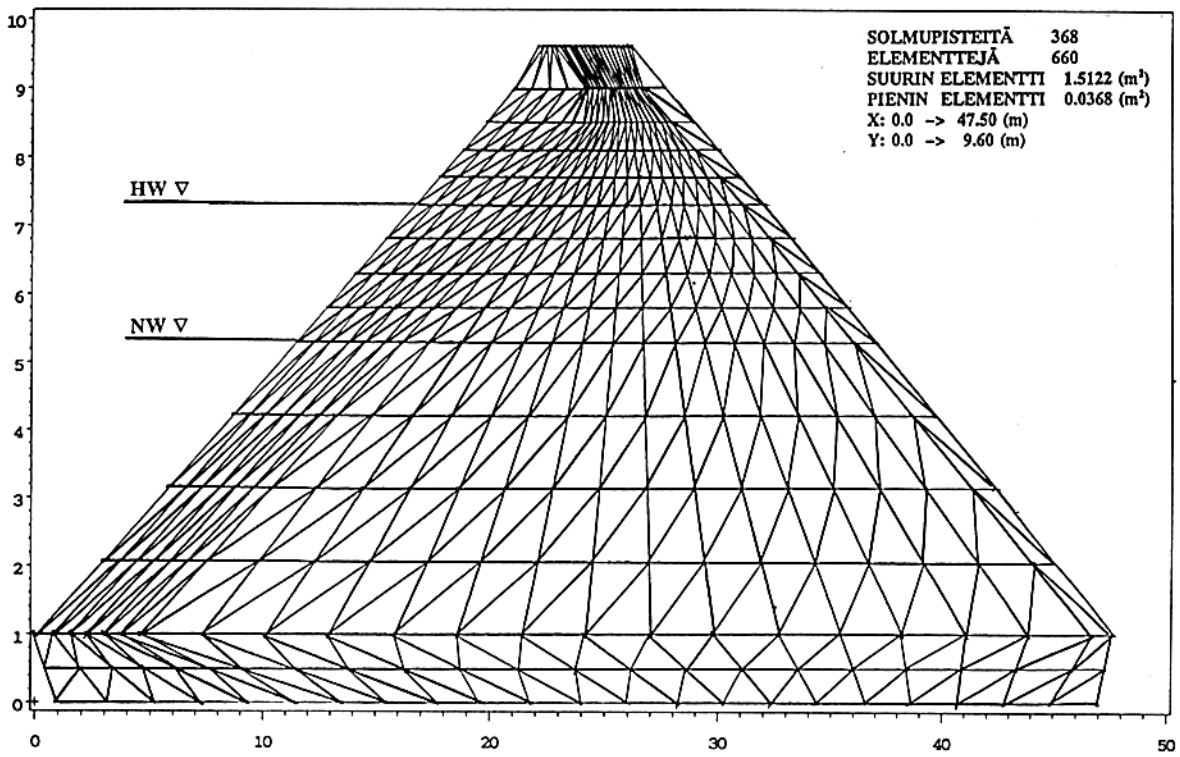
Kuvassa 84 esitetty laskennan tulos, joka alkuarvoiltaan erosi edellisestä (kuva 81) vain siinä, että kuivan luiskan oletettiin olleen koko talven lumeton, mikä ei yleensä vastannut todellista tilannetta.

Elementtilaskennalla selvitettiin myös eristelevyn paksuuden ja sijainnin vaikutusta padon harjan roudan syvyyteen.

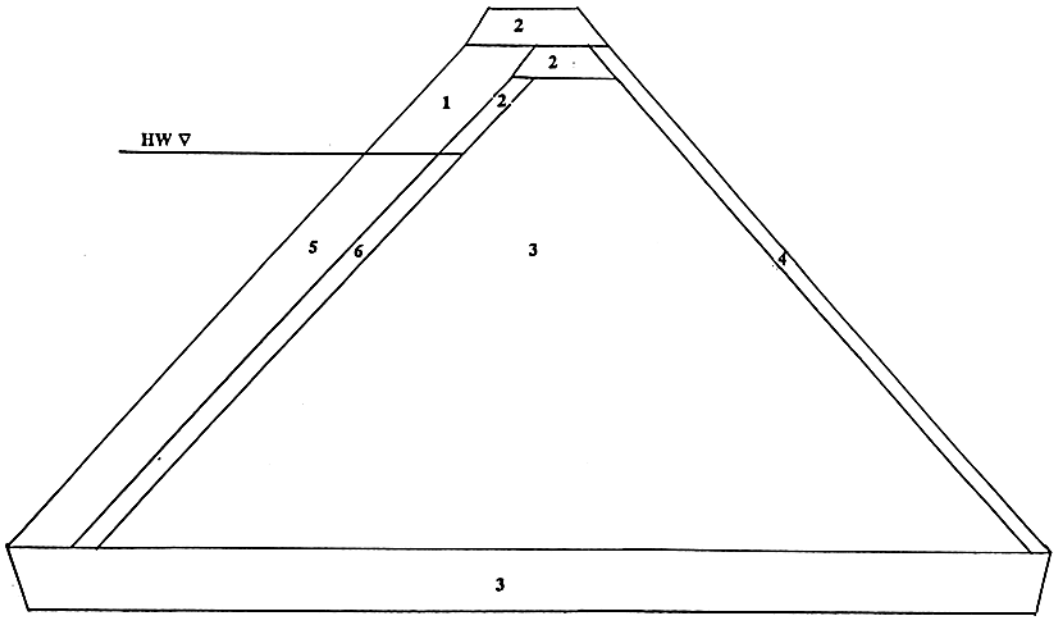
Kuvista 85 ja 86 ilmenee harjasoran alla, moreenin pinnalla, olevan 0,05 m:n tai 0,10 m:n paksuisen polystyreeni eristelevyn vaikutus roudan syvyyteen, kun laskentakautena oli talvi 1984 – 85. Seinäjoen ympäristössä talvi 1986 – 87 oli hieman ankarampi kuin talvi 1984 – 85. Talvella 1984 – 85 routa ulottui Kyrkösjärven padossa HW-tason alapuolelle 0,2 – 0,4 m. Laskentatulosten mukaan jo 0,05 m:n paksuinen polystyreeni eristelevy olisi estänyt poikkileikkauksessa Pl 57+00 roudan tunkeutumisen altaan HW-tason alapuolelle.

Kuvista 87 ja 88 ilmenee korotuksen jälkeisessä tilanteessa vastaavien eristeiden merkitys, kun eriste oli asennettu koko harjan leveydelle sorakerrosten väliin.

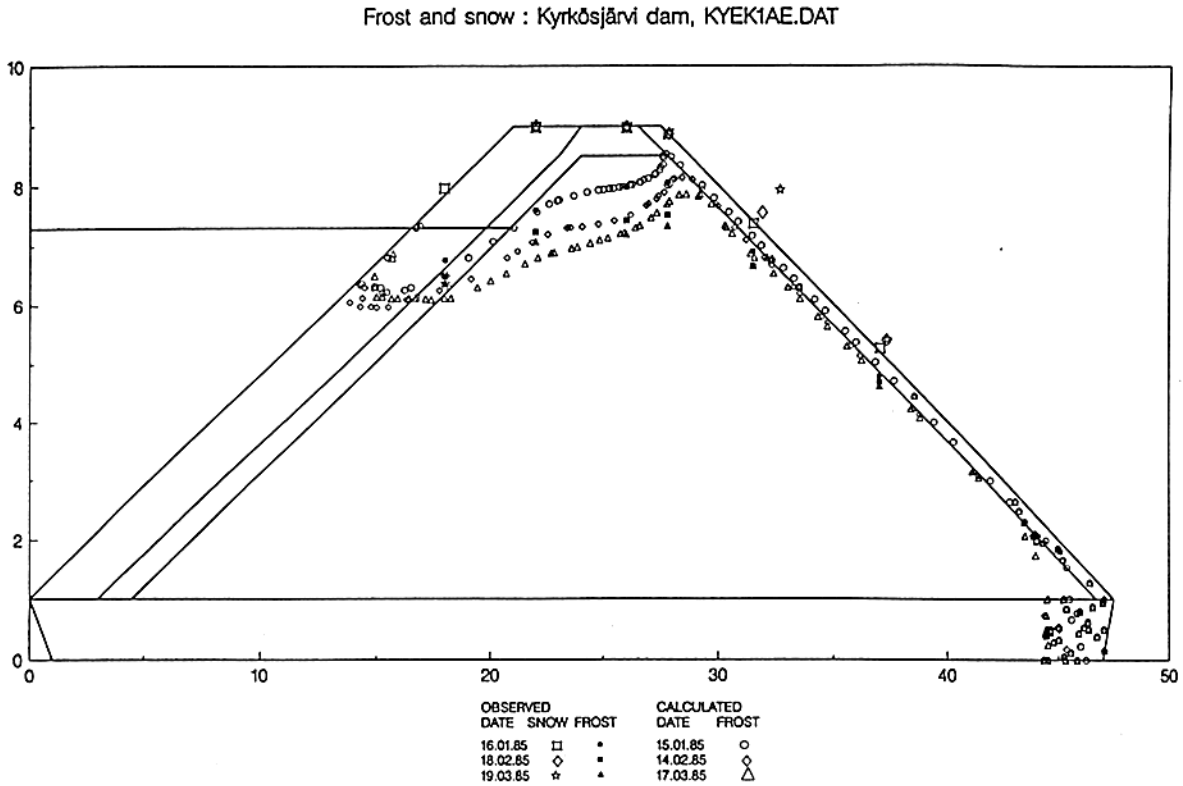
Laskettaessa eristeen vaikutusta roudan syvyyteen moreenin lämmönjohtavuutena käytettiin laboratoriossa määritettyä arvoa. Koska polystyreenieristeen lämmönjohtavuus eroaa suuresti maamateriaalien lämmönjohtavuuksista ollen vain 1/50 moreenin lämmönjohtavuudesta, niin ei maamateriaalien lämmönjohtavuuden arvioinnissa esiintyvillä eroilla ole suurta merkitystä tässä tapauksessa.



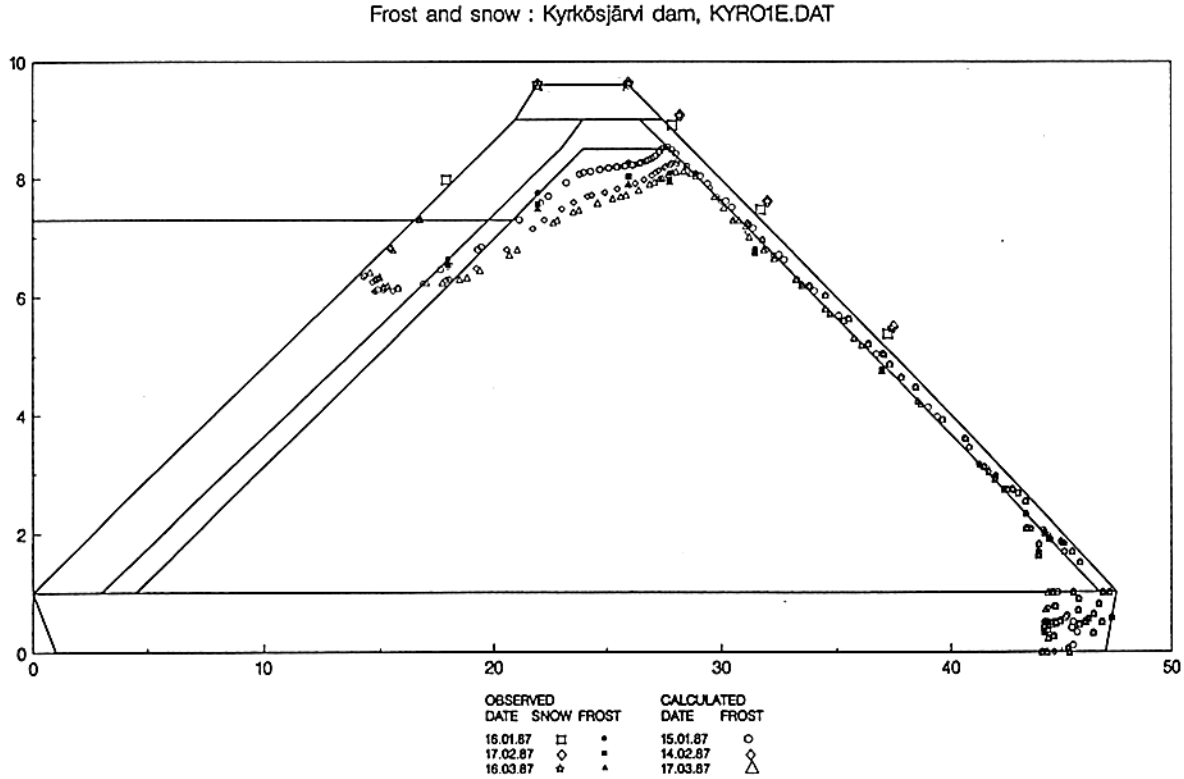
Kuva 78. Kyrkösjärven padon Pl. 57+00 elementtiverkko.



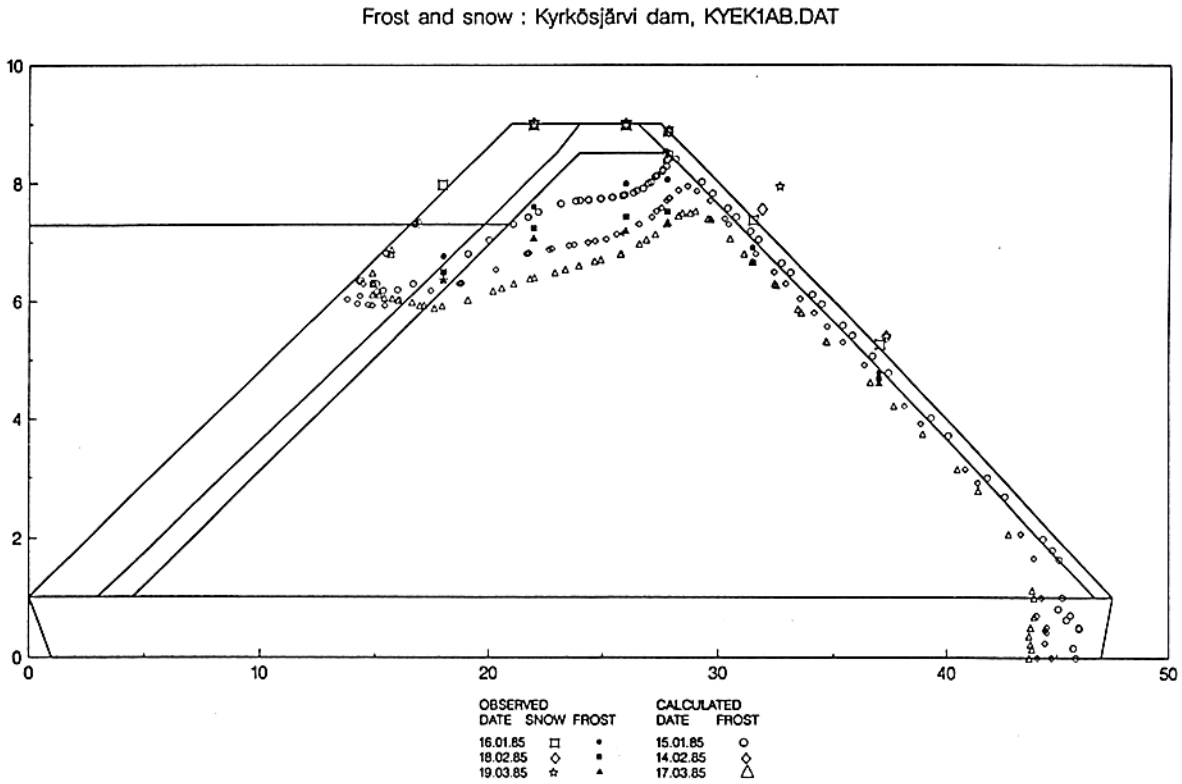
Kuva 79. Kyrkösjärven padon Pl. 57+00 elementtilaskennassa käytetyt padon rakenneosien materiaalit: 1= louhe , 2= sora, 3= moreeni, 4= turve, 5= louhe veden alla, ja 6= sora veden alla.



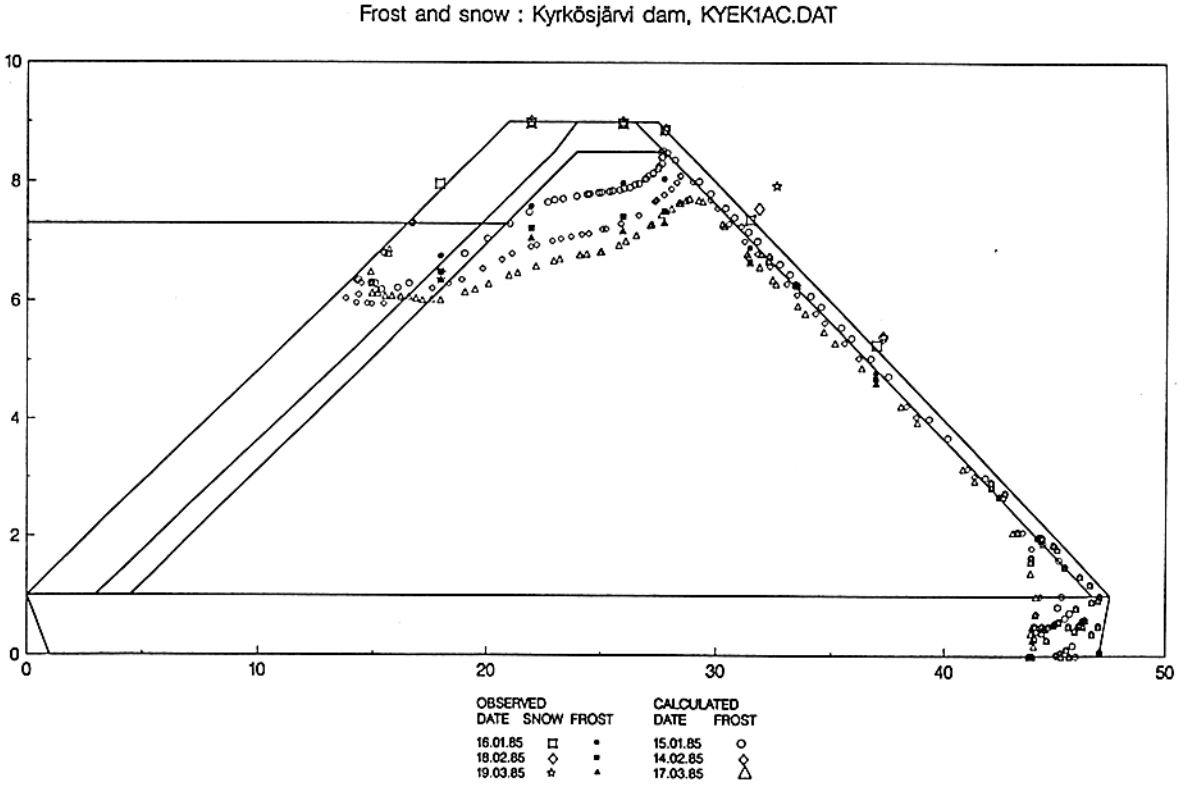
Kuva 80. Kyrkösjärven padon havaitut ja FRACS–ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1984–85 tammikuun, helmikuun ja maaliskuun puolivälissä, kun moreenin oletettiin olevan täysin veden kyllästämä ja kuivassa luiskassa oli lunta.



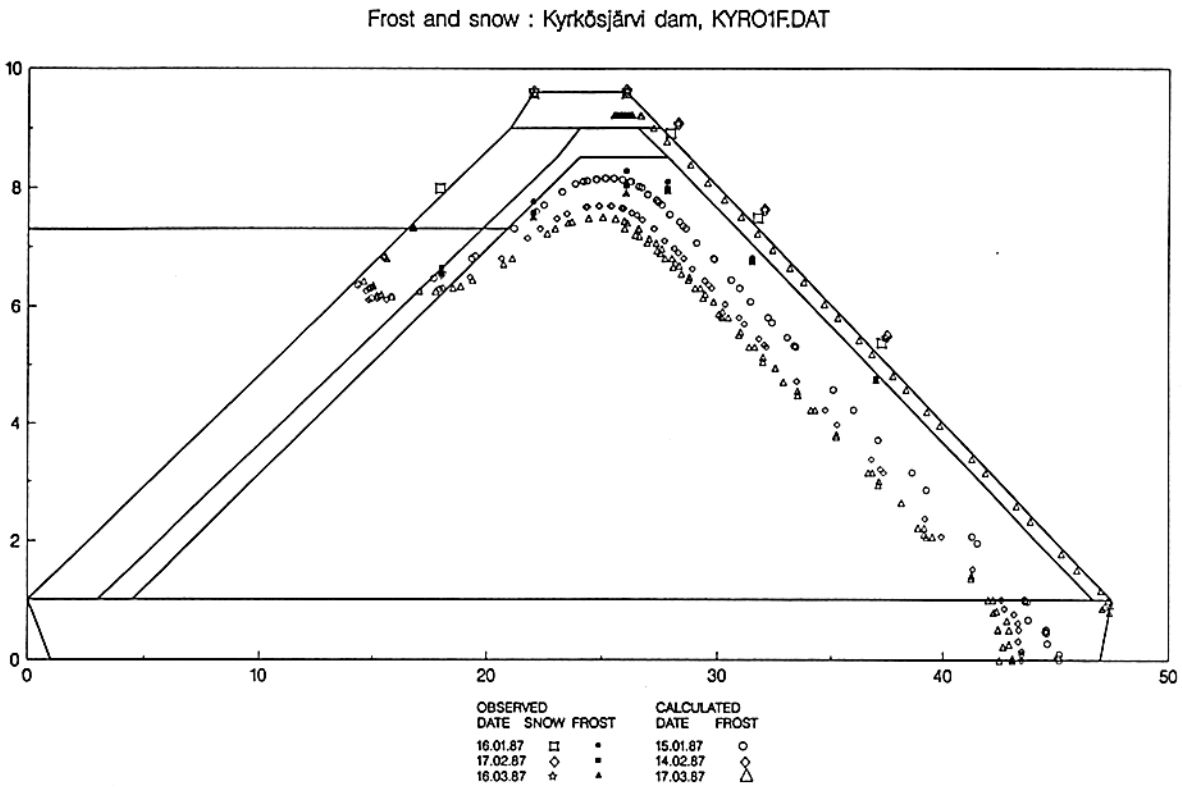
Kuva 81. Kyrkösjärven padon havaitut ja FRACS–ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1986–87 tammikuun, helmikuun ja maaliskuun puolivälissä, kun moreenin oletettiin olevan täysin veden kyllästämä ja kuivassa luiskassa oli lunta.



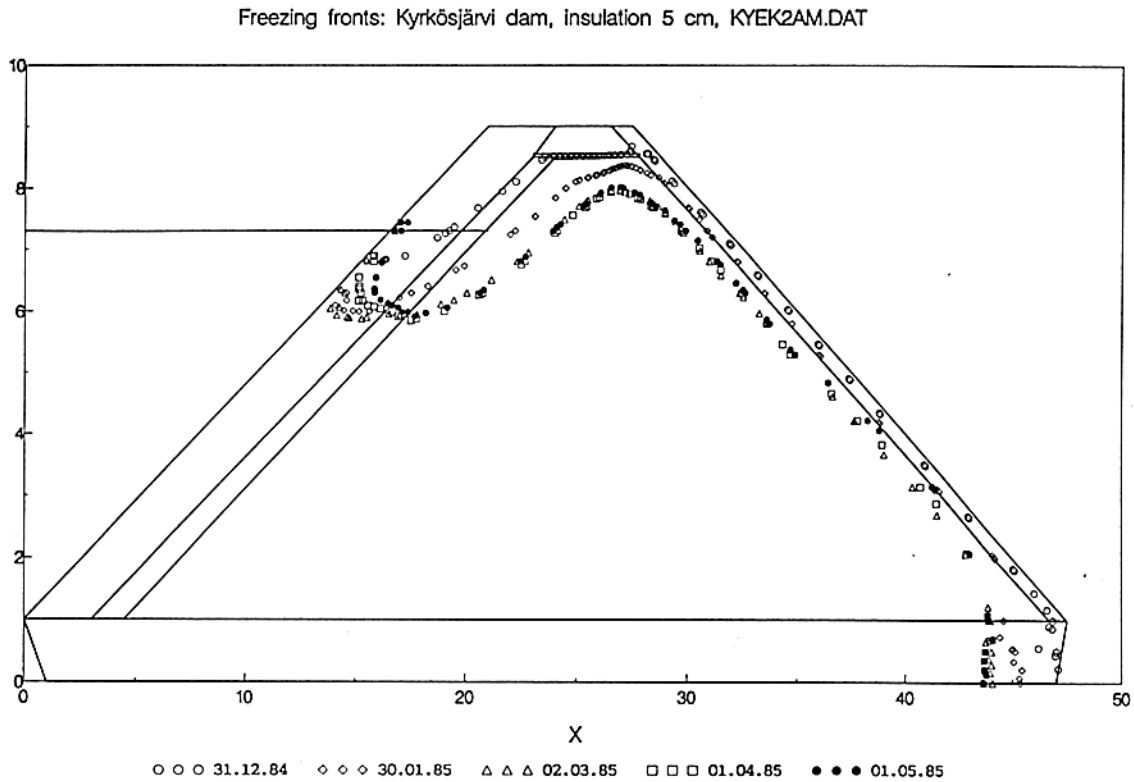
Kuva 82. Kyrkösjärven padon havaitut ja FRACS-ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1984-85, tammikuun, helmikuun ja maaliskuun puolivälissä, kun moreenin lämmönjohtavuutena oli laboratoriossa mitattu arvo ja kuivassa luiskassa oli lunta.



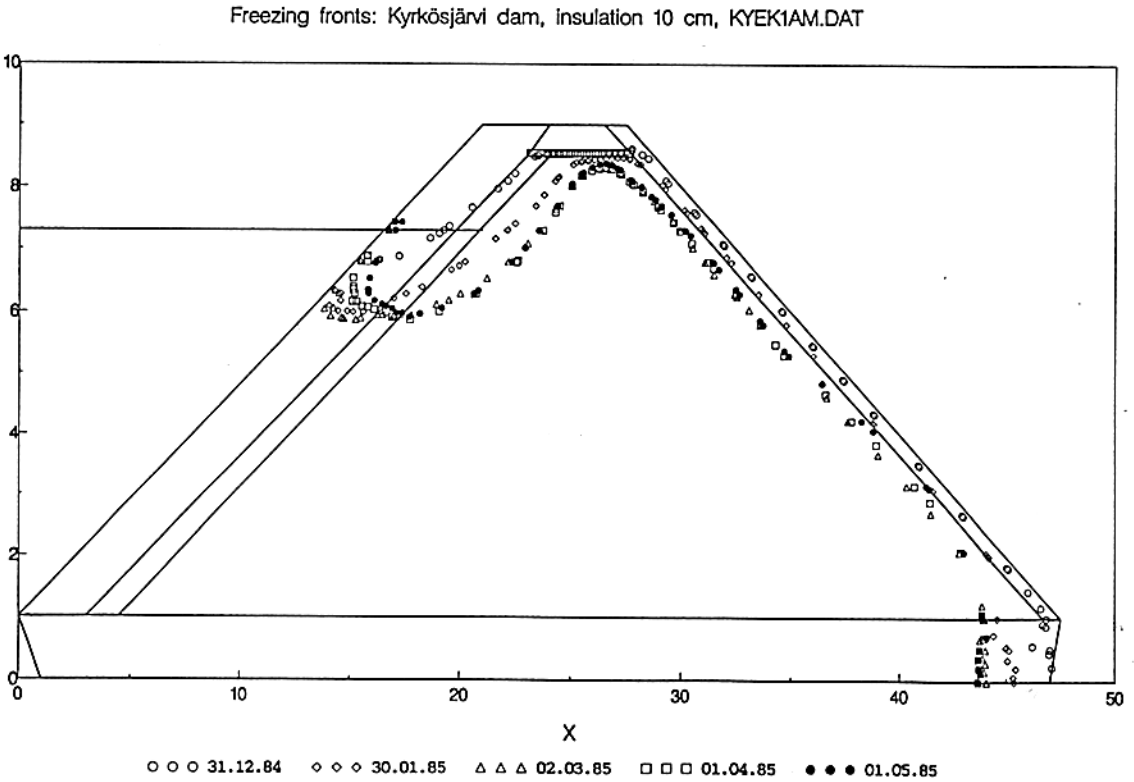
Kuva 83. Kyrkösjärven padon havaitut(routamittari 3) ja FRACS-ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1984-85, tammikuun, helmikuun ja maaliskuun puolivälissä, kun moreenin lämmönjohtavuutena käytettiin Sundbergin arvoja ja kuivassa luiskassa oli lunta.



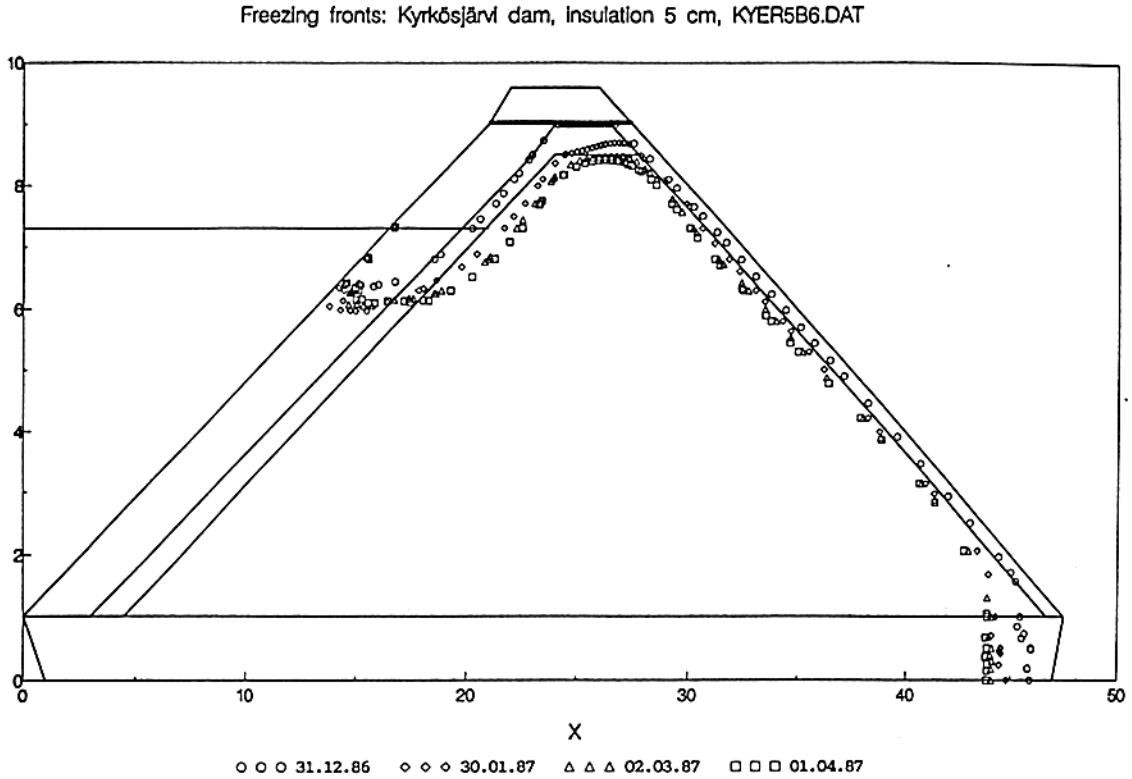
Kuva 84. Kyrkösjärven padon havaitut ja FRACS–ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1986–87 tammikuun, helmikuun ja maaliskuun puolivälissä, kun moreenin oletettiin olevan täysin veden kyllästämä, mutta laskelmissa ei otettu huomioon kuivassa luiskassa olevaa lunta.



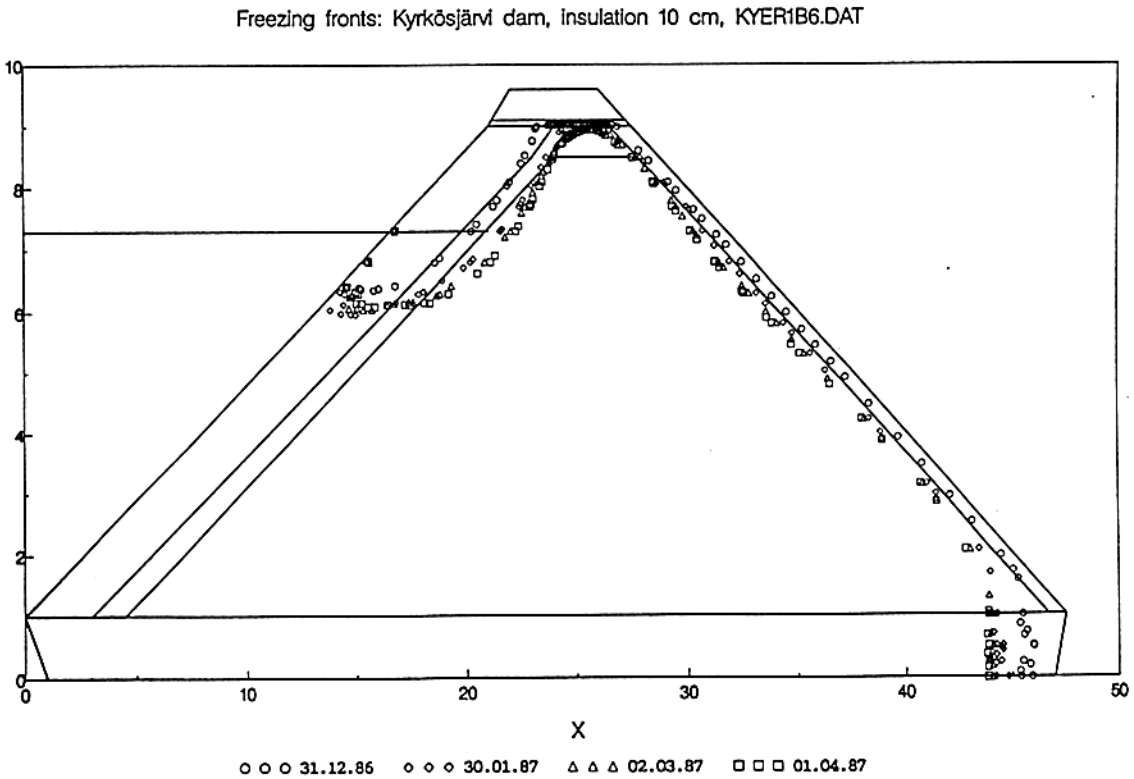
Kuva 85. Kyrkösjärven padon FRACS-ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1984-85, kun moreenin pinnalla, harjasoran alla, oli eristeenä 0,05 m:n paksuinen polystyreenilevy ja kuivassa luiskassa oli lunta.



Kuva 86. Kyrkösjärven padon FRACS-ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1984-85, kun moreenin pinnalla, harjasoran alla, oli eristeenä 0,10 m:n paksuinen polystyreenilevy ja kuivassa luiskassa oli lunta.



Kuva 87. Kyrkösjärven padon FRACS-ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1986-87, kun sorakerrosten välissä oli eristeenä padon koko harjan levyinen ja 0,05 m:n paksuinen polystyreenilevy ja kuivassa luiskassa oli lunta.



Kuva 88. Kyrkösjärven padon FRACS-ohjelmalla lasketut roudan syvyydet talvella 1986-87, kun sorakerrosten välissä oli eristeenä padon koko harjan levyinen ja 0,10 m:n paksuinen polystyreenilevy ja kuivassa luiskassa oli lunta.

11 ROUTANOUSUN ARVIOIMINEN ROUTANOUSUHAVAINTOJEN PERUSTEELLA

Kyrkösjärven padon poikkileikkauksessa Pl. 57+00 tehtiin talvesta 1983 – 84 lähtien routanousuhavaintoja.

Routanousumittareina toimivat routanousulevyt sijaitsivat moreenin pinnalla, harjasoran alla, ja mitattu routanousu kuvasi moreenissa tapahtunutta routanousua. Padon harjan routanousua ei erikseen mitattu.

Routanousumittareiden 1, 2 ja 3 päällä oli 0,5 m harjasoraa kesään 1985 asti. Padon korotuksen jälkeen harjasoran paksuus oli routanousumittareiden 1 ja 2 kohdalla 1 metri.

Tässä tarkastelussa ei ole otettu huomioon routanousulevyn yläpuolista kuormitusta routanousua pienentävänä tekijänä arvioitaessa routanousun ja esimerkiksi pakkasmäärän neliöjuuren ($\sqrt{F}$) välistä riippuvuutta.

Routanousun maksimiksi havaintoaikana mitattiin 81 – 86 mm keväällä 1985.

Liitteenä 5 on esitetty graafisesti routanousu–, roudansyvyys– ja pakkasmäärähavainnot.

Lähinnä routanousumittareita 1 ja 2 oli routamittari 8 ja routanousumittaria 3 routamittari 4.

Routanousun ja pakkasmäärän neliöjuuren välistä vuorosuhdetta selvitettiin epälineaarisella regressiolla käyttäen yhtälöä (66)(Saarelainen 1992)

$$h\ (mm) = k\ \sqrt{F} \qquad (66)$$

Regressiosuoran yhtälö määritettiin erikseen harjan soraosalle ja moreeniosalle. Mukana käsittelyssä olivat mitatut routanousut, joita ei korjattu jo ennen roudan ulottumista moreeniin, routanousulevyn alapuolelle, mitatulla routanousulla.

Havaintokauden 1983 – 91 routanousuhavainnot käsiteltiin kolmessa jaksossa, koko havaintokausi sekä talvet 1984 – 85 ja 1986 – 87 erikseen, koska syksyllä 1985 Kyrkösjärven patoa korotettiin.

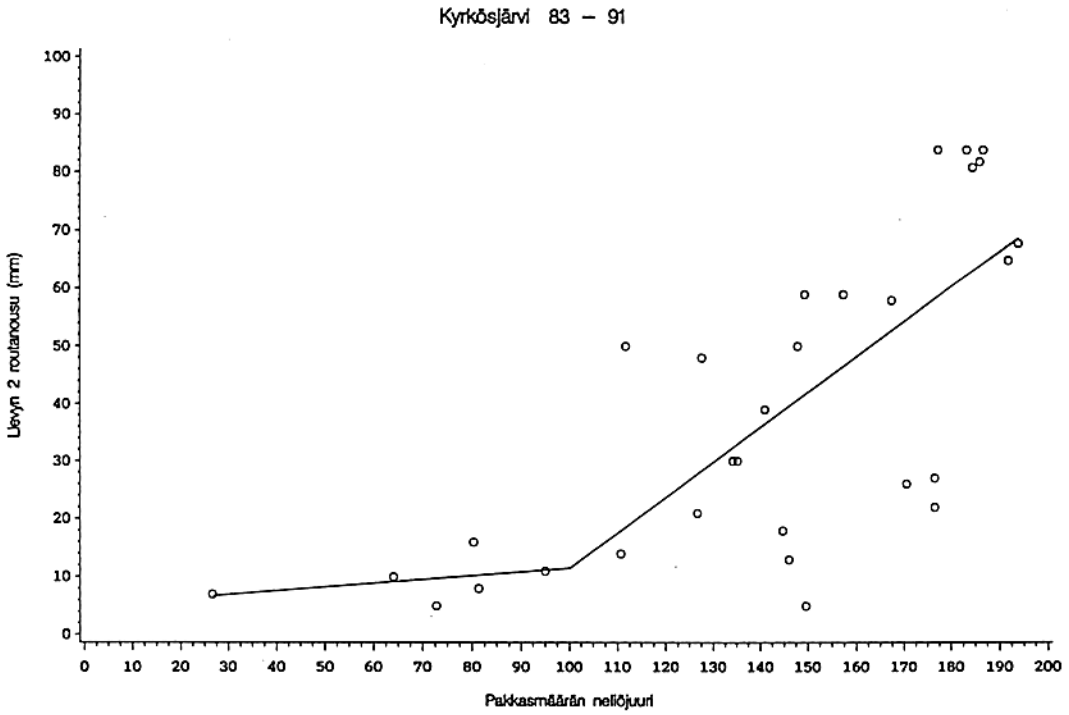
Routanousumittareiden 1, 2 ja 3 moreenissa mitattujen routanousujen sekä pakkasmäärän neliöjuuren epälineaarisen regression vuorosuhdekertoimen k arvot olivat eri havaintojaksojen aineistosta keskenään samaa suuruusluokkaa, 0,57 – 0,72. Poikkeuksen muodostaa routanousumittari 3 havaintotalvena 1986 – 87, jolloin sen routanousun ja pakkasmäärän neliöjuuren välisen vuorosuhdekertoimen k arvo oli 0,49.

Taulukossa 29 esitetään eri havaintokausina routanousun ja pakkasmäärän neliöjuuren välisen vuorosuhdekertoimen k arvo, kun routanousu aiheutui moreenin routimisesta.

Taulukko 29. Epälineaarisella regressiolla saatu vuorosuhdekertoimen k arvo moreenin routimisen aiheuttamien routanousun ja pakkasmäärän neliöjuuren suhteelle.

Routanou-sumittari	vuorosuhdekertoimen k arvo eri havaintojaksoilla 1983 – 91	1984 – 85	1986 – 87
1	0,58	0,72	0,57
2	0,61	0,71	0,60
3	0,63	0,69	0,49

Kuvassa 89 esitetään Kyrkösjärven padon harjamoreenin routimisen aiheuttaman routanousumittarin 2 routanousun ja pakkasmäärän neliöjuuren välisen regressioyhtälön kuvaaja, kun mukana on koko havaintoaineisto. Kuvaajan loivasti oikealle nousevalla osalla routa ei vielä ulottunut moreeniin. Moreeni alkoi jäätyä likimain pakkasmäärällä F = 10000 h°C.



Kuva 89. Kyrkösjärven padon harjamoreenin routimisen aiheuttaman routanousumittarin 2 routanousun ja pakkasmäärän neliöjuuren välinen regressioyhtälö on muotoa $h = 0{,}61 \cdot \sqrt{F}$, kun mukana on koko havaintoaineisto.

Samasta havaintoaineistosta selvitettiin myös routanousun h (mm) ja vastaavana ajankohtana mitatun routanousulevyn alapuolisen roudan syvyyden Z (cm) välistä riippuvuutta lineaarisella regressiolla käyttäen yhtälöä

$$h\ (mm) = k\ Z_{MOREENI}\ (cm) \qquad (67)$$

Mitattuja roudan syvyyksiä korjattiin siten, että otettiin huomioon routanousulevyn yläpuolinen sorakerros vähentämällä sen paksuus roudan syvyyshavainnosta.

Vastaavasti routanousuhavaintoja korjattiin vähentämällä ennen roudan ulottumista moreeniin syntynyt routanousu.

Routanousumittareiden 1 ja 2 routanousujen ja moreenin roudan syvyyden(routamittari 8) välistä riippuvuutta kuvaavan regressioyhtälön vuorosuhdekertoimen k arvo oli 0,64 – 0,67 kaikkina em. havaintokausina.

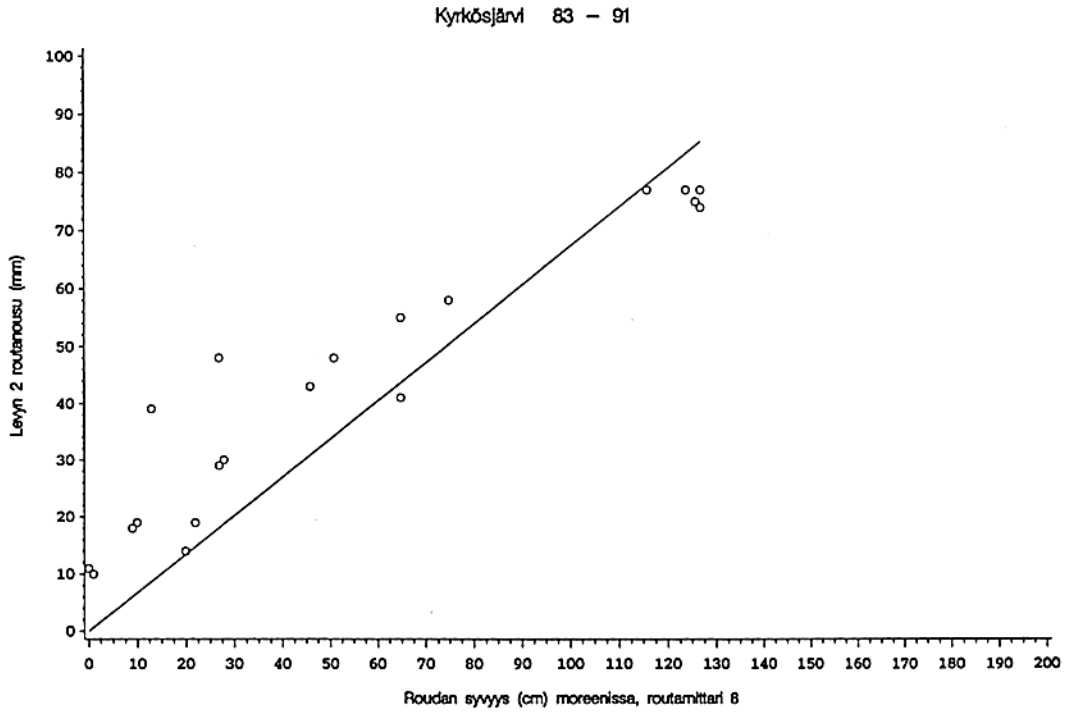
Routanousumittarin 3 routanousun ja moreenin roudan syvyyden(routamittari 4) välistä riippuvuutta kuvaavan regressioyhtälön vuosuhdekertoimen k ar oli 0,81 – 0,82.

Taulukossa 30 on esitetty eri havaintokausina moreenin routimisesta aiheutuneen routanousun ja moreenissa mitatun roudan syvyyden välisen vuorosuhdekertoimen k arvo.

Taulukko 30. Lineaarisella regressiolla saatu vuorosuhdekertoimen k arvo moreenin routimisen aiheuttamien routanousun ja moreenin roudan syvyyden suhteelle.

Routanousumittari	vuorosuhdekertoimen k arvo eri havaintojaksoilla 1983 – 91	1984 – 87	1984 – 85 ja 1986 – 87
1	0,66	0,65	0,64
2	0,67	0,65	0,65
3	0,82	0,81	0,81

Kuvassa 90 on esitetty Kyrkösjärven padon routanousumittarin 2 routanousun ja routamittarin 8 moreenissa mitattujen roudan syvyyksien välisen regressioyhtälön kuvaaja, kun mukana on koko havaintoaineisto.



Kuva 90. Kyrkösjärven padon routanousumittarin 2 routanousun ja routamittarin 8 roudan syvyyden regressioyhtälö on h = 0,67·Z koko havaintoaineistosta, kun on otettu huomioon vain roudan syvyys moreenissa ja korjatut routanousut.

12 MAAPADON HARJAN ROUTASUOJAUS

12.1 Patoturvallisuusohjeiden vaatimukset

Patoturvallisuusohjeissa (VYH 1991) asetetaan maapadon kuivavaralle 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–padossa kuivavara määräytyy vastaavasti suurimman aallonkorkeuden tai kerran viidessä vuodessa toistuvan pakkasmäärän aiheuttaman routasyvyyden perusteella."

Liikenteen vaikutus roudan syvyyteen on otettava huomioon erikseen. Yleissääntönä voidaan pitää, että vain poikkeustapauksissa padon harjalla sallitaan liikennettä. Toisaalta padon harjan on kaikkina vuodenaikoina jo patoturvallisuuden vuoksi oltava liikennöitävässä kunnossa. Padon harjalle tiivistekerroksen päälle on rakennettava riittävän paksu suojakerros routimattomasta maasta kuten hiekasta, sorasta tai murskeesta, jotta harja olisi aina kulkukelpoinen. Tarpeeton liikenne padon harjalla voidaan estää esimerkiksi puomien avulla.

Tämän tutkimuksen yhteydessä ei saatu lisätietoa talviaikaisen liikenteen ottamiselle huomioon routamitoituksessa, koska yhtään routamittaria ei ollut sellaisen maapadon harjalla, jossa olisi ollut jatkuvasti liikennöitävä yleinen maantie. Aikaisemmin on esitetty, että niiden patojen mitoituksessa käytettäisiin luvulla 1,25 kerrottua ilman pakkasmäärää, joka johtaa noin 10 %:n lisäykseen roudan syvyydessä (Helander ja Slunga 1984).

12.2 Roudan syvyyden arviointi

Maapadon kuivavara on joko mitoitettava yhtä suureksi kuin mitoituspakkasmäärää vastaava roudan syvyys tai käyttämällä harjan routasuojana eristemateriaaleja voidaan vastaava lopputulos saavuttaa pienemmällä kuivavaralla.

Vertailtaessa normaalikausien 1931 – 60 ja 1961 – 90 vuorokauden keskilämpötilahavaintojen perusteella laadittuja pakkasmääräkarttoja, voidaan todeta, että normaalikauden 1931 – 60 pakkasmäärää F_{20} vastaa suuressa osassa Suomea normaalikauden 1961 – 90 pakkasmäärä F_{10}.

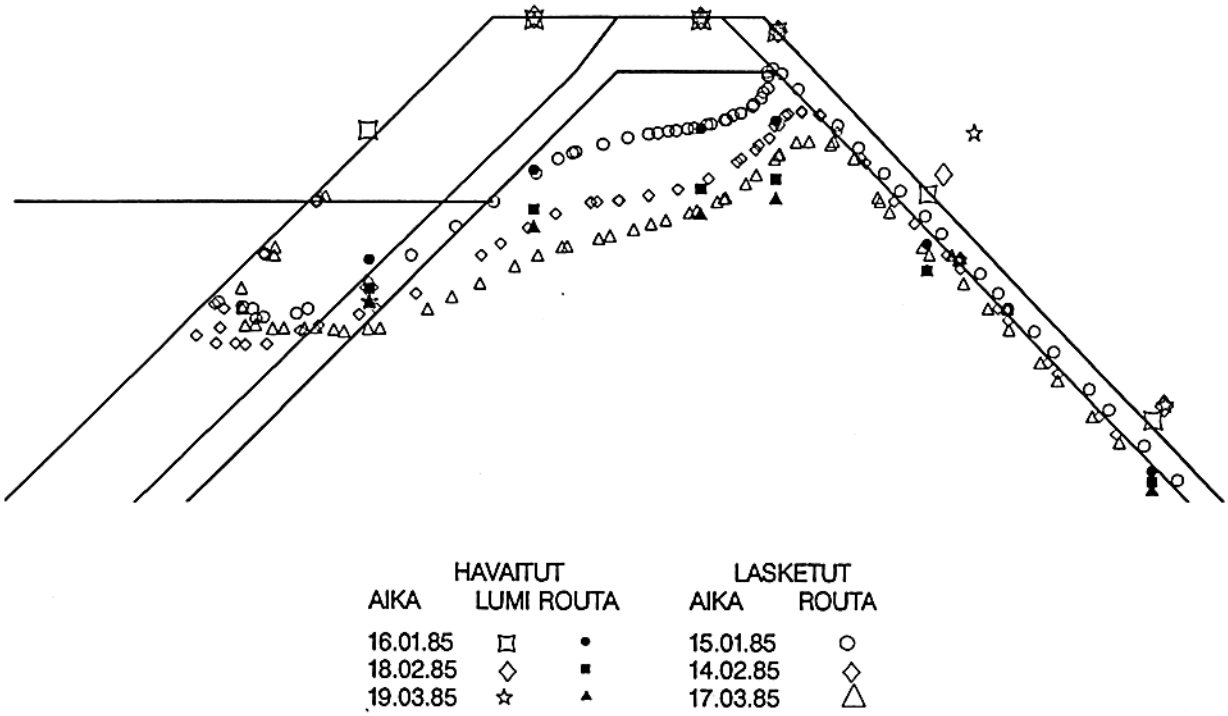
Kuvassa 91 esitetään sekä mitattu että FRACS–elementtiohjelmalla laskettu roudan syvyys Kyrkösjärven padon harjalla poikkileikkauksessa Pl. 57+00 tammikuussa, helmikuussa ja maaliskuussa talvella 1984 – 85.

Maapadon riittävä kuivavara roudan syvyyden perusteella voidaan yleensä määrittää eri patotyypeille yhtälöllä $Z = k \cdot \sqrt{F}$ kohdassa 10.2.8 esitetyillä vuorosuhdekertoimen k arvoilla ja pakkasmäärillä.

Mikäli padon harjaosa rakennetaan materiaalista, jonka lämmönjohtavuus poikkeaa tutkittujen patojen materiaalien lämmönjohtavuuksista, ei em. yhtälöä voida käyttää.

Tällöin voidaan mitoitus tehdä kohdassa 10.3.3 esitetyllä Watzingerin yhtälöllä.

Mahdollisen lumipeitteen eristävää vaikutusta padon harjalla ei oteta eikä myöskään tämän tutkimuksen perusteella tule ottaa kuivavaran mitoituksessa huomioon, koska lumiolosuhteet vaihtelevat suuresti eri talvina.



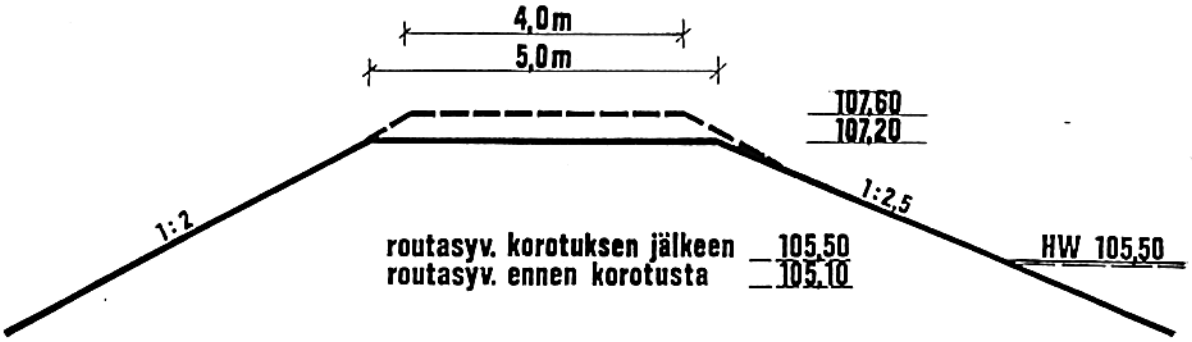
Kuva 91. Mitattu ja FRACS-ohjelmalla laskettu roudan syvyys Kyrkösjärven padon harjalla poikkileikkauksessa Pl. 57+00 tammikuussa, helmikuussa ja maaliskuussa talvella 1984 - 85.

12.3 Maamateriaalien käyttö routasuojauksessa

Padon harjan routasuojaus voidaan tehdä routimattomilla materiaaleilla kuten sora, hiekka, turve tai masuunihiekka (kuva 92). Suojakerroksen paksuus määritetään kohdassa 10 esitetyillä menetelmillä. Tämän tutkimuksen kohdassa 4 on esitetty luonnonmateriaalien lämpöteknisiä ominaisuuksia.

Turvetta on käytetty padon harjan lämpöeristeenä Kivi- ja Levalammen padossa lähinnä kokeiluna, jonka aikana turve toimi hyvänä eristeenä. Ainoa haitta on, että se ei kestä edes vähäistä huoltoliikennettä. Yleisemmin turvetta käytetään padon kuivan luiskan verhoilumateriaalina, joka toimii samalla myös eristeenä.

Masuunihiekan lämmönjohtavuudelle voidaan noin 5 %:n vesipitoisuudessa käyttää arvoa λ = 0,40...0,45 W/mK. Sitoutuneenakin masuunikuona eristää lämpöä selvästi paremmin kuin luonnon hiekka, jonka lämmönjohtavuus tiivistettynä, 5 %:n vesipitoisuudessa on noin 2,5-kertainen masuunihiekkaan verrattuna (Viljas 1993).



Kuva 92. Harjan routasuojauksen parantaminen maa-aineksella.

12.4 Eristemateriaalien käyttö routasuojauksessa

Eristemateriaaleja voidaan käyttää maapadon harjan routasuojauksessa erityisesti silloin, jos niiden avulla tulee kustannussäästöjä vähentyneinä massamäärinä tai esimerkiksi pohjamaan heikko kantavuus estää padon korottamisen. Myös maisemalliset syyt voivat estää padon harjan korottamisen.

Routasuojauksen suunnittelussa on otettava huomioon, että maapadon harjalla on ainakin huoltoliikenteen oltava mahdollista. Liikenteestä tulevan kuorman johdosta käyttökelpoisia materiaaleja ovat suulakepuristettu polystyreeni ja kevytsora.

Käytettäessä suulakepuristettua polystyreenilevyä routaeristeenä on otettava huomioon seuraavia asioita (Frost i jord Nr.17 1976):

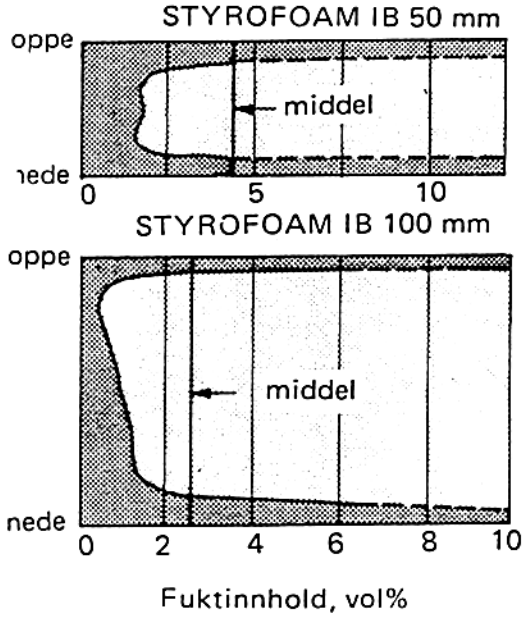
-eristelevy on suojattava riittävän paksulla maakerroksella (esimerkiksi 0,3 – 0,5 m soraa) eristeen pitkäaikaisen kuormituskestävyyden takaamiseksi,
-eristelevyn alle on tehtävä tasoituskerros esimerkiksi hiekasta estämään eristelevyn rikkoutuminen,
-eristelevyn yläpuoliselle pinnalle on asennettava suojaava muovikalvo estämään eristelevyn vettyminen ja lämmöneristysominaisuuksien huononeminen,
-eristelevy on asennettava hieman kaltevaksi veden poisjohtamiseksi eristelevyn pinnalta,
-eristelevyn minimipaksuudeksi patorakenteissa suositellaan 50 mm, koska ohuemmat eristelevyt voivat rikkoutua jo asennusvaiheessa ja ne vettyvät nopeammin eivätkä säilytä rakenteen koko käyttöikää riittävää eristyskykyä,
-eristys suositellaan tehtäväksi yhdestä levystä, koska kosteuden lisääntyessä levyn lämmönjohtavuus kasvaa ja kaksi ohutta levyä vettyvät nopeammin kuin yksi paksumpi eristelevy (kuva 93) ja
-padon harjan eristeen on lämpöhäviöiden pienentämiseksi oltava riittävän leveä ja tarvittaessa on eristettä jatkettava esimerkiksi 1 metrin matkan luiskan suuntaisina .

Kuvista 94 ja 95 voidaan määrittää suulakepuristetun polystyreenilevyn ja kevytsoran mitoituslämmönjohtavuudet routasuojauksessa eri käyttöolosuhteissa (VTT/GEO 1987).

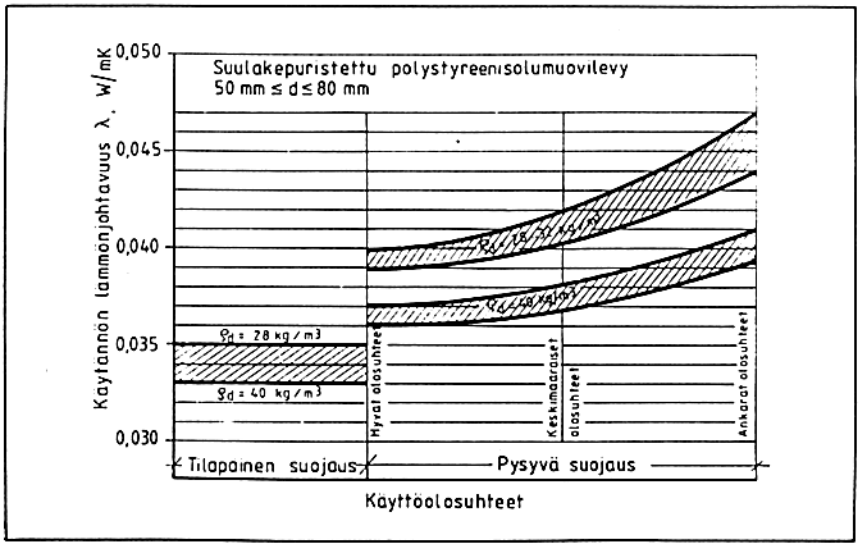
Kevytsoran käyttö padon harjan routaeristeenä on ollut erittäin vähäistä, mutta tierakenteissa sitä käytetään yleisesti sekä routaeristeenä että kevennysmateriaalina.

Laskemalla eristeen lämmönvastus m_e kaavalla (68), voidaan saman eristystehon saavuttamiseksi tarvittavien eristepaksuuksien perusteella vertailla routasuojauksen eri rakennevaihtoehtoja toisiinsa ja arvioida niiden soveltuvuutta kyseiseen tapaukseen (Frost i Jord Nr. 17 1976).

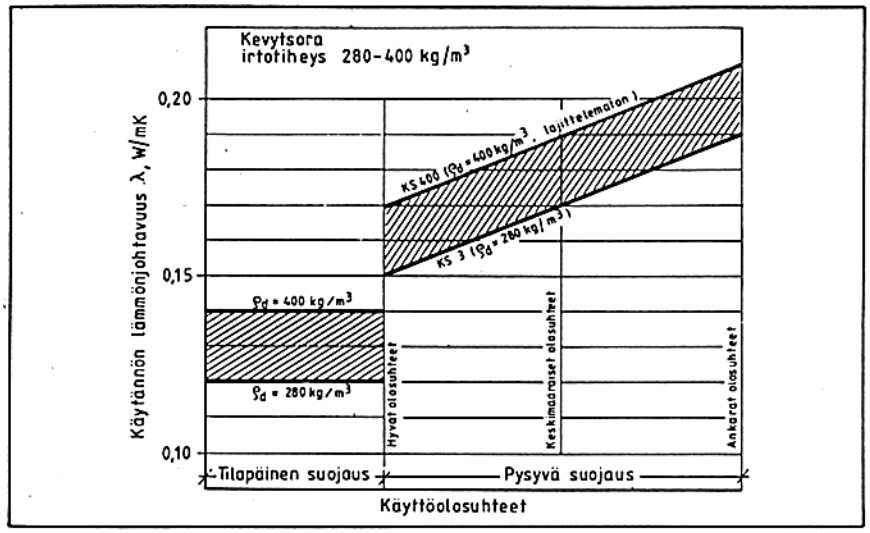
$$m_e = \frac{d_e}{\lambda_e} \tag{68}$$



Kuva 93. Kosteuden jakaantuminen 50 mm ja 100 mm paksuissa polystyreenilevyissä (Frost i jord Nr.17 1976)).

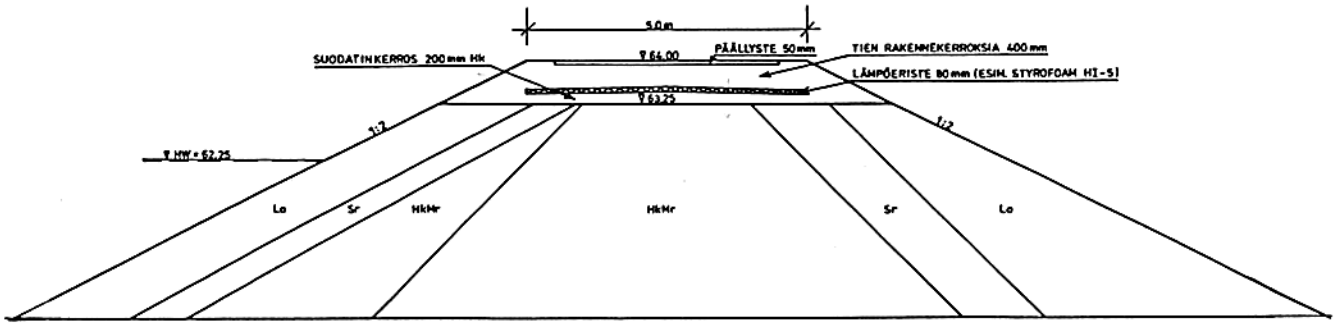


Kuva 94. Suulakepuristetun polystyreenilevyn mitoituslämmönjohtavuudet routasuojauksessa eri käyttöolosuhteissa (VTT/GEO 1987).



Kuva 95. Kevytsoran mitoituslämmönjohtavuudet routasuojauksessa eri käyttöolosuhteissa (VTT/GEO 1987).

Kuvassa 96 esitetään periaateratkaisuna Ylivieskassa Hamarinkosken maapadossa toteutettu harjan routaeristäminen eristelevyillä. Maisemallisista syistä ei maapadon harjatasoa haluttu rakentaa korkeammaksi.



Kuva 96. Hamarinkosken maapadon harjan routaeristyksen parantaminen eristelevyillä (Kokkolan vesi- ja ympäristöpiiri).

13 YHTEENVETO JA SUOSITUKSET

13.1 Yleistä

Tässä tutkimuksessa selvitettiin laboratoriotutkimuksilla moreenin routimisominaisuuksia ja lämpöteknisiä ominaisuuksia sekä maastossa mitattiin maapadon koko poikkileikkauksen roudan ja lumen syvyyksiä, padon tiivistemoreenin routanousuja, vedenläpäisevyyden muutoksia, vesipitoisuuden vaihteluja, patopoikkileikkauksen lämpötilavaihteluita sekä tarkasteltiin padon harjan routasuojaustapoja.

13.2 Talvikausien sää havaintoaikana

Havaintojen käsittelyssä tarvittavat pakkasmäärät laskettiin aina patoa lähinnä sijaitsevan säähavaintoaseman vuorokauden keskilämpötilahavainnoista.

Lämpötilahavaintojen mukaan normaalikausi 1961 – 90 oli hieman kylmempi kuin normaalikausi 1931 – 60. Verrattaessa pakkasmäärien toistuvuuksia näinä kahtena normaalikautena, voitiin todeta, että normaalikauden 1931 – 60 pakkasmäärää F_{20} vastaa lähes koko Suomessa likimain normaalikauden 1961 – 90 pakkasmäärä F_{10}.

13.3 Roudan syvyyshavainnot

Roudan syvyyttä mitattiin padon harjalla 21 maapadossa sekä homogeenisissä moreenipadoissa että vyöhykepadoissa eri puolilla Suomea. Homogeeniset moreenipadot, joista mitattiin roudan syvyyksiä sijaitsevat Pohjanmaan rannikkoalueella. Vyöhykepadot sijaitsevat Etelä- ja Itä-Suomessa sekä Lapissa, mutta niissä tehtiin roudan syvyyden mittauksia vain muutamana vuotena ja joidenkin patojen mittaukset vaikuttivat epäluotettavilta. Tästä aiheutui edelleen epävarmuutta vyöhykepadon roudan syvyyden arvioinnissa, mutta homogeenisen moreenipadon roudan syvyyksistä saatiin laajan havaintoaineiston vuoksi paljon uutta tietoa varsinkin, kun havaintokauteen sisältyi kaksi erittäin ankaraa talvea.

Talvella 1984 –85, jonka pakkasmäärä oli $F \approx F_{20(31-60)}$ Pohjois-Suomea lukuunottamatta, jossa talvi oli leudompi, vyöhykepadoissa mitattiin roudan maksimisyvyydeksi 1,50 – 3,08 metriä ja homogeenisissä moreenipadoissa 1,77 – 2,69 metriä.

Maasto-olosuhteiden vaikutus roudan syvyyteen näkyi Kivi- ja Levalammen routahavainnoissa, sillä siellä roudan syvyys oli aina pienempi kuin muilla lähialueen padoilla. Padon suojaisan sijainnin vuoksi siellä oli aina lähes koko talven lunta.

Routasuojauksen tehokkuus näkyi Hipin, Kivi- ja Levalammen ja Varpulan patojen routahavainnoissa.

Kaitforsin maapatoon liittyvien säännöstelypatojen yhteydessä selvitettiin roudan etenemistä betonirakenteen läpi ja tiivisteseinää pitkin maapatorakenteeseen. Lisäksi toteutettiin yhden säännöstelypadon, jonka luukkurakenteet olivat maapadon keskilinjan altaan puolella, maapadon vastaisten seinien routaeristys. Mittausten mukaan 2 metriä maapadon sisään ulottuvan betonisen tiivisteseinän päässä roudan syvyys

talvella 1984 –85 oli yli 3 metriä, kun se varsinaisella maapato–osuudella oli 2,18 m. Nämä havainnot osoittavat, että betoni– ja maapatojen liittymärakenteiden suunnittelussa tulee huomioida routa. Liittymärakenteen tulisi ulottua maapatoon noin 5 metriä ja betoniseinää paremmin siihen soveltuu teräsponttiseinä, joka ohuempana rakenteena johtaa huonommin lämpöä. Lisäksi tulisi säännöstelyrakenteiden luukut rakentaa padon keskilinjan kuivalle puolelle, jolloin altaan vesi estää maapadon jäätymisen.

13.4 Lumihavainnot

Tehdyt lumihavainnot osoittivat, että eri padoilla lumisuhteet vaihtelivat suuresti eikä padon harjalla yleensä ollut lunta. Edelleen on suositeltavaa jättää lumi ottamatta huomioon maapadon roudan syvyyttä arvioitaessa, vaikka ainakin Itä–Suomessa ja Lapissa lunta yleensä on runsaasti.

13.5 Routanousuhavainnot

Maapatojen tiivistesydämen routanousun suuruudesta ei ollut aikaisempia havaintoja, joten tutkimuksen yhteydessä routanousumittareina toimivat routanousulevyt asennettiin Kyrkösjärven patoon poikkileikkaukseen Pl.57+00 moreenin pinnalle. Suurin mitattu routanousu oli 86 mm keväällä 1985. Routanousun maksimisuuruudesta ei välttämättä saatu tietoa, koska Kyrkösjärven padon toisessa tutkimuspoikkileikkauksessa routa oli yleensä 0,3 – 0,4 metriä syvemmällä ja todennäköisesti routanousu olisi ollut suurempi.

13.6 Patorakenteen lämpötilahavainnot

Mittaamalla patorakenteen lämpötiloja lämpötila–antureilla saatiin perustietoa routalaskelmien lähtöarvoja varten.

Roudan syvyyden laskentaa varten määritettiin Kyrkösjärven padon keskilinjalle poikkileikkaukseen Pl.57+00 asennetuista lämpötila–antureista lämpötilagradientti Skaven–Haugin esittämällä tavalla. Lämpötilagradientti G vaihteli välillä 1,3 – 2,0 ^{0}C/m routarajan alapuolisessa 1,5 metriä paksussa maakerroksessa 1. päivänä helmikuuta. Skaven–Haugin käyristä saatu lämpötilagradientin arvo oli suurempi, mutta se oli mitattu luonnon olosuhteissa tie– ja rautatierakenteissa eikä patorakenteessa.

13.7 Patomateriaalien ominaisuudet

Kyrkösjärven ja Kalajärven maapadoista otetuista padon harjaosan moreeninäytteistä määritettiin Tampereen teknillisen korkeakoulun Rakennustekniikan osaston rakennusgeologian laboratoriossa ominaispinta–ala, kapillaarinen nousukorkeus ja routanousunopeus.

Yhteenvetona em. kokeiden tuloksista voidaan todeta, että vaikka rakeisuuskäyrän perusteella näytteet olivat varsin samanlaisia, niin Kalajärven padon Pl. 20+00 näytteet

poikkesivat em. ominaisuuksiltaan selvästi muista näytteistä. Näiden näytteiden ominaispinta–ala oli vain 50% Kyrkösjärven moreenin ominaispinta–alasta, kapillaarinen nousukorkeus oli vastaavasti vain 25 – 35 % muiden näytteiden kapillaarisesta nousukorkeudesta ja samoin routanousunopeus oli 20 – 30 % muiden näytteiden routanousunopeuksista.

Kalajärven padon poikkileikkauksen Pl. 20+00 moreeni erosi ominaisuuksiltaan varsin paljon myös saman padon poikkileikkauksen Pl. 72+00 moreenista eli useiden eri routivuuden määritysmenetelmien perusteella ensin mainittu moreeni oli routimatonta tai lievästi routivaa ja jälkimmäinen moreeni oli keskinkertaisesti tai erittäin routivaa. Koska patoihin tarvittavaa moreenia ei yleensä saada yhdestä maanottopaikasta, niin saman padon eri patojaksojen routivuudessa oli eroja.

Kyrkösjärven patomoreenista määritettiin keväällä 1993 Oulun Yliopiston Rakentamistekniikan osaston geotekniikan laboratoriossa laskentaa varten kvartsipitoisuus ja lämpöteknisistä ominaisuuksista mm. lämmönjohtavuus.

Näytteet oli otettu samoista poikkileikkauksista kuin Tampereella 1986 tutkitut näytteet; Pl 50+75 korkeustaso + 81,50 – 82,00 ja Pl 57+00 korkeustaso + 81,50 – 82,00. Näytteet seulottiin ja niistä määritettiin kvartsipitoisuus Oulun Yliopiston Elektronioptiikan laitoksen röntgendiffraktometrillä. Rakeisuudeltaan näytteet poikkesivat toisistaan vain vähän, mutta kvartsipitoisuuksissa oli selvä ero. Poikkileikkauksesta Pl 50+75 otetun näytteen kvartsipitoisuus oli 25,0 % ja Pl 57+00 otetun 9,3 %.

Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan moreenin kvartsipitoisuus vaihteli eri raekokoalueilla noin 5 – 50 %:n välillä.

Koska suurempi kvartsipitoisuus merkitsi suurempaa lämmönjohtavuutta, päädyttiin siihen, että määritykset suoritettiin Pl 50+75 näytemateriaalille. Tällöin tulokset olivat "varmemmalla puolella".

13.8 Vedenläpäisevyyden mittaus padolla

Padon harjaosan routimisen haittavaikutuksia selvitettiin padolla suoritetuilla vedenläpäisevyyden mittauksilla ja niiden tuloksia verrattiin mahdollisuuksien mukaan padon rakentamisen aikaisiin tarkkailutuloksiin. Mittauksia suoritettiin muutamalla padolla vuosina 1979, 1980 ja 1993 ja niiden tulokset on esitetty taulukossa 2, johon on myös merkitty, kuinka monta kertaa havaintoaikana routa ulottui ko. mittaustasolle.

Vuonna 1993 suoritetut mittaukset osoittivat Hirvijärven ja Liikapuron padoissa vedenläpäisevyyden kasvua verrattuna aikaisempiin mittauksiin, eivätkä kaikki tulokset täytä suunnitteluvaatimusta vedenläpäisevyyskertoimen arvolle $k \leq 10^{-6,5}$ m/s. Kalajärven tuloksissa oli hieman heilahtelua, mutta niistä ilmeni vedenläpäisevyyden kasvu yli 10 vuoden aikana. Kyrkösjärven padolla 1993 tehtyjä mittaustuloksia saattoi verrata vain työnaikaisiin tarkkailutuloksiin, joihin nähden vedenläpäisevyys oli jonkin verran kasvanut. Suurimmillaan vedenläpäisevyys oli kasvanut noin 10–kertaiseksi esimerkiksi Hirvijärven padon poikkileikkauksessa Pl. 39+00. Toisaalta itse mittausmenetelmä ei ollut tarkka eikä määritys tapahtunut täsmälleen samasta kohtaa padon harjaa, joten saatuja vedenläpäisevyyskertoimen muutoksia voidaan pitää vain suuntaa antavina. Routimisen vaikutus moreenin vedenläpäisevyyteen vaatii lisätutkimuksia.

13.9 Vesipitoisuuden muutokset routarajalla padon harjalla

Kyrkösjärven padon poikkileikkauksien Pl.50+75 ja Pl 57+00 harjaosien moreenin vesipitoisuuden muutoksia roudan sulamisaikana ja sen jälkeen selvitettiin suorittamalla radiometrisiä mittauksia padossa vuosina 1985 ja 1986.

Poikkileikkauksesta Pl. 50+75 otettujen näytteiden vesipitoisuus oli samaa luokkaa radiometristen mittausten tulosten kanssa, ja ne osoittivat noin 10 til. % vaihtelua välittömästi routarajan alapuolella olevassa maakerroksessa eli vettä nousi jäätyneeseen moreeniin aiheuttaen routanousua. Tarkemman kuvan saamiseksi vesipitoisuuden vaihtelusta padon harjaosassa mittauksia olisi pitänyt tehdä läpi vuoden.

13.10 Roudan syvyyden arvioiminen routahavaintojen perusteella

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää eri laskentamenetelmien soveltuvuutta maapadon roudan syvyyden arvioimiseen ja kuivavaran mitoitukseen. Jos padon kuivavara on liian pieni, pienempi kuin roudan syvyys, niin usein HW–tason alapuolelle ulottunut routiminen lisää vedenläpäisevyyttä niin paljon, että se voi johtaa patoluiskan sortumiseen sisäisen eroosion seurauksena. Routahavaintoja tehtiin talvesta 1979–80 lähtien yhteensä 21 eri padolla eri puolilla Suomea. Roudan syvyyshavaintoja oli yhteensä 6000, termoelementtihavaintoja samoin 6000 ja noin 200 routanousuhavaintoa.

Roudan syvyyshavaintojen sekä neliöjuuri pakkasmäärän että pakkasmäärän välistä vuorosuhdetta selvitettiin käsittelemällä havaintoaineistoa tilastollisesti yhtälöillä $Z = k \cdot \sqrt{F}$ ja $Z = A_0 \cdot F^{A1}$.

Tilastollisen käsittelyn tuloksena päädyttiin seuraavaan suositukseen:

Homogeenisen moreenipadon roudan syvyys voitaisiin määrittää koko Suomen alueella kaavalla

$X = \frac{1}{100}$

$$Z = 1{,}2 \cdot \sqrt{F_{20(31-60)}} \text{ tai}$$

$$Z = 1{,}2 \cdot \sqrt{F_{10(61-90)}}$$

Vyöhykepadoille, joiden tiivistesydän on moreenia, voitaisiin käyttää kaavaa

$$Z = 1{,}3 \cdot \sqrt{F_{20(31-60)}} \text{ tai}$$

$$Z = 1{,}3 \cdot \sqrt{F_{10(61-90)}}$$

Vyöhykepadoille, joiden tiivistesydän on savea, voitaisiin käyttää kaavaa

$$Z = 1{,}05 \cdot \sqrt{F_{20(31-60)}} \text{ tai}$$

$$Z = 1{,}05 \cdot \sqrt{F_{10(61-90)}}$$

Eteläisimmässä Suomessa em. kaavoilla päädytään ainakin savisydän vyöhykepadoilla roudan syvyyteen < 2 m , joka vähäisten roudan syvyyshavaintojen mukaan olisi riittävä.

13.11 Roudan syvyyden arvioiminen Watzingerin yhtälöllä

Roudan syvyyttä laskettiin yksiulotteisessa tapauksessa ns. muunnetulla Watzingerin yhtälöllä. Laskettu roudan eteneminen homogeenisessä maapatorakenteessa eri pakkasmäärillä vastasi suhteellisen hyvin mitattuja roudan syvyyksiä. Vyöhykepadoille saadaan em. yhtälöllä liian pieniä roudan syvyyksiä.

Edellytyksenä Watzingerin yhtälön menestykselliselle käytölle oli laskentaparametrien: vesipitoisuus, tilavuuspaino ja lämmönjohtavuus sulana ja jäätyneenä määrittäminen tai "oikea valinta". Toisaalta PC:lle ohjelmoidun Watzingerin yhtälön käyttö oli helppoa ja nopeaa, jolloin laskenta voitiin nopeasti suorittaa useilla parametrien arvoilla.

13.12 Roudan syvyyden laskeminen elementtimenetelmällä

FRACS–elementtiohjelmalla saatiin varsin hyvin mittauksia vastaavia roudan syvyyksiä. Kyrkösjärven patopoikkileikkauksen Pl. 57+00 laskennoissa reunaehtona padon ulkorajoille annettiin ulkolämpötila kuukauden tai viikon keskilämpötiloina ja altaan puoleiselle vedenalaiselle osalle altaan mitattu veden lämpötila samoin kuukauden tai viikon keskilämpötiloina. Laskennan alkulämpötiloina käytettiin padon eri osille lämpötila–antureilla mitattuja lämpötiloja. Muut laskentaparametrit valittiin joko laboratoriotutkimusten tulosten, padon työnaikaisten tarkkailutulosten ja kirjallisuudesta saatujen mitoituskäyrien perusteella.

Normaaliin suunnitteluun elementtimenetelmä ei sovi, mikäli ei ole saatavissa luotettavia lähtöarvoja laskennalle.

13.13 Routanousun arvioiminen

Moreenin routimisen aiheuttaman routanousun ja neliöjuuri pakkasmäärän välistä vuorosuhdetta selvitettiin käsittelemällä havaintoaineistoa tilastollisesti regressioyhtälöllä $h = k \cdot \sqrt{F}$, jolloin vuorosuhdekertoimen k arvo vaihteli eri havaintojaksoilla välillä 0,57 – 0,72.

Routanousun ja moreenin roudan syvyyden välistä vuorosuhdetta selvitettiin regressioyhtälöllä $h\ (mm) = k \cdot Z\ (cm)$, jolloin vuorosuhdekertoimen k arvo vaihteli eri havaintojaksoilla välillä 0,67 – 0,82.

Vähäisen havaintoaineiston perusteella voitaisiin moreenin routanousun (h) katsoa noudattavan moreenin roudan syvyyden (Z) suhteen seuraavaa yhtälöä:

$$h\ (mm) = 0{,}67 \cdot Z\ (cm)$$

3.14 Suositus maapadon kuivavaran mitoittamiseksi

Maapadon kuivavara arvioidaan patoturvallisuusohjeiden mukaan aallon korkeuden tai roudan syvyyden perusteella.

Tutkimuksen yhteenvetona voidaan todeta, että roudan syvyyden arviointi riittävällä tarkkuudella ilman eristemateriaaleja voidaan suorittaa yhtälöllä $Z = k \cdot \sqrt{F}$, jossa vuorosuhdekerroin valitaan patotyypin perusteella kohdan 13.10 mukaisesti ja mitoituspakkasmääränä käytetään joko $F = F_{20(31-60)}$ tai $F = F_{10(61-90)}$. Esitys johtaa nykyistä käytäntöä hieman suurempiin roudan syvyyksiin.

Watzingerin yhtälön sovelluksella voidaan arvioida roudan syvyyttä kerroksellisessa rakenteessa, kun halutaan selvittää eristemateriaalin vaikutusta roudan syvyyteen.

Kuivavaran mitoituksessa tulee ottaa erikseen huomioon liikenteen vaikutus roudan syvyyttä lisäävänä tekijänä.

Mikäli vanhojen patojen kuivavara ei aivan täytä patoturvallisuusohjeiden vaatimuksia, niin yhtenä käytännön vaihtoehtona olisi asentaa padon harjalle padon pituudesta riippuen kaksi tai useampia routamittareita, joilla seurattaisiin roudan maksimisyvyyttä. Koko patolinjan roudan syvyys voitaisiin tarvittaessa määrittää maatutkalla, jonka käytöstä mm. Imatran Voima Oy:llä on tutkimustuloksia. Tutkimusten mukaan maatutkan mittaustarkkuus roudan syvyyden mittauksessa on luokkaa 0,1 – 0,4 metriä Tämän lisäksi tulisi tarvittaessa asettaa rajoituksia sille, mille tasolle normaalia ankaramman talven jälkeen esimerkiksi tekojärvi kevättulvien aikana voitaisiin täyttää. Vaarallisin tilanne padon vakavuuden kannalta syntyy, kun padon harjaosa on jäässä HW–tason alapuolelle ja altaan vesi nopeuttaa roudan sulamista ko. tasolla. Seurauksena voi olla sisäisen eroosion aiheuttama luiskan sortuma, kuten käytännössä on myös tapahtunut.

Poikkeuksellisissa tilanteissa, jolloin vesipinta patoa vasten on vaarassa nousta tiivistesydämen yläpinnan tasolle, tulisi etukäteen pystyä arvioimaan aika, minkä pato turvallisesti kestäisi tässä tilanteessa. Vyöhykepato asianmukaisine suodatinrakenteineen kestää paremmin kuin homogeeninen pato.

Jatkotutkimuksena tulisi selvittää nykyistä tarkemmin routimisen vaikutus moreenin vedenläpäisevyyteen sekä tämän perusteella tehdä sortumariskin arviointi padoille, joiden kuivavara ei täytä vaatimuksia.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Aittomäki, A. 1974. Routasuojaus. Pohjarakennus RIL 95. Helsinki 1974. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, s. 313 – 324.

Aittomäki, A. & Saviharju, K. 1971. Maalajien lämpöteknillisistä ominaisuuksista. Otaniemi 1971.VTT. Lämpöteknillinen laboratorio.Tiedonanto 14. 48 s.

Andersland, O.B. & Anderson, D.M. 1978. Geotechnical engineering for cold regions, New York. 551 p.

Arhippainen, E. 1969. Maapadonrakennusta yli kahden vuosikymmenen ajan valtion voimayhtiöissä, Maansiirto–lehti, 3/1969 s. 8–16 ja 4/1969 s. 8–13.

Auvinen, K. 1990. Vyöhyke– ja louhemaapadon tiivistyssydämen routaantuminen ja routiminen, diplomityö, Oulun Yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Rakentamistekniikan osasto. 75 s.

Brown, W.G. & Johnston, G.H. 1970. Dikes on permafrost: Predicting Thaw and Settlement. Canadian Geotechnical Journal, 7, 365 (1970).

Cedergren, H.R. 1967. Seepage, Drainage and Flow Nets. John Wiley & Sons. USA.

Ehrola, E. 1973. Ilmastollisten ja rakenteellisten tekijöiden vaikutuksesta tien routaantumiseen ja routimiseen. Oulu, Oulun Yliopisto, Lisensiaatintyö. 140 s.

Farouki, O.T. 1981. Thermal Properties of Soils. CRREL, Monograph 81–1, New Hampshire, U.S.A., 136 p.

Farouki, O.T. 1986. Thermal Properties of Soils.Series on Rock and Soil Mechanics vol.11 (1986). Trans Tech Publications D–3392 Clausthal–Zellerfeld, Germany. 136 s.

Flygare, P., Kivikoski, H. & Niskala, E. 1989. Maakosketuksessa olevat lämpöeristeet. Kenttätutkimus. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus,Tiedotteita 1061. 105 s. + liitt. 97 s.

Friberg, P. & Slunga, E. 1989. Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen, Otaniemi, Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 130 s.

Fulgeo Oy Geotekniset ohjelmat, käyttöohje, julkaisematon moniste.

Frost i Jord Nr. 17 1976. Sikring mot teleskader. Oslo 1976. Norges teknisk–naturvitenskapelige forskningsråd og statens vegvesens Utvalg for Frost i Jord.Slutrapport Nr 17 Nov. 1976. 400 s.

Gill, J.D. & Brew M.P. 1983. Permafrost condition at the Wataba dam site. Proc. 4th Int. Conf. "Permafrost" 1983, Fairbanks, Alaska, U.S.A., US. Nat. Academy Press, Washington D.C. , pp. 347–352.

Helander, R. & Slunga, E. 1983. Maapatojen routaantuminen ja routasuojaus, Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, julkaisematon. 47 s.

Helander, R. 1985. Maan terminen analyysi elementtimenetelmällä, diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto. 68 s.

Huttunen, E. 1991. Tulisaaren maapadon sisäinen eroosio. Diplomityö. Oulun yliopisto. Geotekniikan laboratorio. 72 s.

ISSMFE Technical Committee on Frost, TC-8., Work report 1985-1989. VTT Symposium 94, Frost in geotechnical engineering, Volume 1. Int.Symp. 13-15.3.1989, Saariselkä, Finland. Edited by Hans Rathmayer. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 1989. p. 15-70.

Johansen, Ø. 1973. Beregningsmetode for varmeledningsevnen av fuktige og frosne jordarter. Del II. Norges teknisknaturvitenskapelige forskningsrådog statens vegvesens Utvalg for Frost i Jord (1973) 10 , s. 13-28.

Johansen, Ø. 1976. Thermal conductivity of soil and rock. Norges teknisk-naturvitenskapelige forskningsråd og statens vegvesens Utvalg for Frost i Jord (1976) 16. s. 13-21.

Johansen, Ø & Frivik, P.E. 1980. Thermal properties of soils and rock materials. The 2nd International Symposium on Ground Freezing, Tronheim, June 24. - 26. 1980. s. 427 - 453.

Johnston, G.H. 1969. Dykes on permafrost, Manitoba, Kelsey generating station, Canadian Geotechnical Journal, 6 , 139 (1969).

Jones, C.W. 1981. Closed-System Freezing of Soils in Linings and Earth Embankment Dams, REC-ERC-81-1, Water and Power Resources Service, Engineering and Research Center, Denver, Colorado 80225. 52 p.

Jumikis, A.R. 1962. Soil mechanics. New Jersey. 791 p.

Jumikis, A.R. 1977. Thermal geotechnics, New Jersey, Rutgers University Press. 375 p.

Kalliomäki, M-L. Helsinki 1970. Talviolosuhteiden ja jäätymisen vaikutuksesta moreenin ominaisuuksiin maapatoa rakennettaessa. Maataloushallituksen insinööriosasto, Maa- ja vesiteknillinen tutkimustoimisto, Tiedotus 7/1970. 93 s.

Kankare, E. 1972. Lämpöeristeiden mitoituksesta ja käytöstä. Maarakennus ja kuljetus. 1972:11-12.

Keil, L.D. , Nielsen, N.M. & Gupta, R.C. 1973. Thawconsolidation of permafrost dyke foundation at the Long Spruce generating station. 26th Canadian Geotechnical Conference, University of Toronto, Toronto, Ontario.

Kerkelä, S. 1990. Dielektrisyysarvo ja teiden rakennekerrosten mittaaminen maatutkalla. Diplomityö. Oulun yliopisto. Geotekniikan laboratorio. 66 s.

Kersten, M.S. 1949. Thermal properties of soils. University of Minnesota, Engineering Experiment Station, Bulletin 28.

Kolkki, O. 1966. Taulukoita ja karttoja Suomen lämpöoloista kaudelta 1931-1960. Liite Suomen meteorologiseen vuosikirjaan, nide 65, osa 1a-1965. Helsinki 1966. Ilmatieteellinen keskuslaitos. 42 s.

Kujala, K. 1991. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils, Department of Civil Engineering, University of Oulu, 90100 Oulu, Finland, Acta Univ. Oul. C58. 99 p.

Kuusiniemi, R. 1985. Improving the frost protection in the earth dams of the Finnish Waters. 15th International Congress on Large Dams, Lausanne 1985.

Kuusiniemi, R. 1989. The frost damages of the core of earth dams, Frost in Geotechnical Engineering, Vol 2, International Symposium, Saariselkä, Finland 1989, VTT symposium 94, pp. 665–677. ISBN 951–38–3313–5, ISSN0357–9387.

Kuusisto, E. 1986. Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys r.y. Mänttä. s. 48–53.

Kyrkösjärven patomoreenin lämpötekniset ominaisuudet, OY 1993. Tutkimusraportti, Oulun yliopisto, Rakentamistekniikan osasto, Geotekniikan laboratorio, Oulu 11 s. + liitt.

Körkkö, R., Loukola, E. & Maijala, T., Hautaperän maapadon varmuuden tarkistus. Vesihallituksen tiedotuksia 228, Helsinki 1983.

Langham, E. 1981. Physics and properties of snow cover. Chapter 7 in handbook of snow, ed. by B. Gray & D. Male, Pergamon Press, Toronto. pp. 275–337.

Leskelä, A. Helsinki 1992. Maapatojen kunnon arviointi. Imatran Voima Oy, tutkimusraportti IVO A06/92. 49 s., ISBN 951–8928–86–X, ISSN 0782–7415.

Loukola, E. 1985. Pehmeikölle perustettavan Taasian maapadon jännitykset ja muodonmuutokset. Vesihallituksen monistesarja nro 362, Helsinki, 87 s.

Mäkelä, H. & Tammirinne, M. Rakennusten perustusten routasuojausohje. Espoo 1979. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 37. 53 s.

Mäkelä, H. , Saarelainen, S. & Kujala, K 1990. Geomekaniikka II, Ril 152–2–1990, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y., Helsinki 1990. s. 271– 295.

Morrison, R.D. 1983. Groundwater monitoring technology, procedures, equipment and applications. Published by Timco Mfg.,Inc., 111 p.

Nieminen, P. 1985. Moreenin hienoaineksen laatu ja sen vaikutus routimisherkkyyteen, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Julkaisu 34 . 81 s.

Nordal, R.S. & Refsdal, G. 1989. Frost protection in design and construction. VTT Symposium 94. Frost in geotechnical engineering. Espoo. Volume 1 pp. 127–163. ISBN 951–38–3313–5, ISSN 0357–9387.

Othman, M.A. & Benson, C.H. 1993. Effect of freeze–thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. Canadian Geotechnical Journal, vol. 30, number 2, April 1993. pp. 236–246.

Parè, J. J. & Lavallèè, J. G. 1978. Frostpenetration studies in glacial till on the James Bay hydroelectric complex. Canadian Geotechnical Journal, 15 (1978):4.

Patoturvallisuusohjeet, Helsinki 1991. Vesi– ja ympäristöhallinnon julkaisuja–sarja B, nr 9 . 85 s.

Pohjarakennus, RIL 95–1974, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., Helsinki 1974. s. 321–323.

Raportti vesihallitukselle tehdyistä routakokeista. TTKK 1987. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Rakennusgeologian laboratorio. Tampere 1987. 4 s.

Routa maa- ja pohjarakentamisessa. RIL K66 - 1986 ,Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y.,Helsinki 1986. 278 s.

Routavauriot ja routasuojaus, RIL 193-1992, Suunnitteluohjeita ja esimerkkejä. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., Lahti 1992. 89 s.

Ruckli, R. 1950. Der Frost im Baugrund. Wien, Springer-Verlag. 270 S.

Saarelainen, S. 1992. Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland, The SSR model. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 119 s. , ISBN 951-38-4073-5, ISSN 1235-0621.

Sadovsky, A.V. & Dorman, Y.A. 1982. Groud freezing 1980, Netherland, Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 28 Elsevier. 411 p.

Sahi, K. 1985. Kapillaarimetrin, malli SAHI, käyttöohje. Tampere 1985. (Julkaisematon)

SAS Institute Inc., SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Volume 2, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1989. 846 pp. ISBN 1-55544-376-1

SAS Institute Inc., SAS/GRAPH Softfare: Reference, Version 6, First Edition, Volume 2, Cary, NC: SAS Institute Inc., 1990. 664 pp. ISBN 1-55544-379-6

Sayles, F.H. 1987. Embankment dams on permafrost. Special report 1987-11, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.

Schmugge, T. , Jackson T. & McKim H. 1980. Survey of methods for soil moisture determination. Water Resources Research, vol. 16.

Sheng, D. Luleå 1990. Numerical Modelling of Frost and Thaw Penetration, Licentiate thesis , 1990:03 L, Tekniska Högskolan i Luleå, Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Department of Civil Engineering. 103 p.

Sheng, D. Luleå 1990. The User's Manual of FRACS. Luleå University of Technology, Department of Civil Engineering. 13 p.

Sippola, L. 19890. Kausittaisen roudan ja keinotekoisesta jäädytyksestä aiheutuvan roudan syvyyden laskentamenetelmät, diplomityö, Oulun yliopisto, Rakentamistekniikan osasto. 67 s.

Skaven-Haug, S. 1972. The design of Frost Foundations, Frostheat and Soilheat. Oslo. Norwegian Geotechnical Institute, Publication nr 90.

Smith, N.J. 1983. Performance of dikes on permafrost foundation in Manitoba. 24th CANCOLD meeting, Winnipeg, Manitoba.

Solantie, R. 1992. Lämpötilanmuutos Suomessa "vanhasta" normaalikaudesta 1931-1960 "uuteen" 1961-1990. Eripainos , Lapin Tutkimusseuran vuosikirja 1992. s. 33-42.

Soveri, U. & Johanssen, S. 1966. Havaintoja lumesta raivatun maan routaantumisesta ja sulamisesta Suomessa v. 1958 – 1964. Helsinki. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Julkaisu 107. 56 s.

Sundberg, J. 1988. Thermal Properties of Soils and Rocks. Linköping. Swedish Geotechnical Institute, Rapport No 35 . 279 p., ISSN 0348–0755.

SNiP II–18–76. Perustat ja perustukset ikiroutamailla. Rakentamisen normit ja ohjeet. RIL, Normikäännös 1985. 96 s.

Susimaa, J. 1981. Moreenimaapatojen routaantuminen ja routiminen, Helsinki, Vesihallituksen monistesarja 1981:94. 103 s.

Talonrakennuksen routasuojausohjeet. VTT/GEO 1987. VTT , geotekniikan laboratorio. 2. painos 1989. 94 s.

Tattari, S. & Granlund K. 1989. Maankosteusmittareiden kalibrointi, Vaasan– ja Kokkolan vesi– ja ympäristöpiirit. Vesi– ja ympäristöhallituksen monistesarja Nro 146, Helsinki,25 s., ISBN 951–47–1763–5, ISSN 0783–3288.

The Norwegian Water Resources and Energy Administration, The Norwegian regulations for Planning, Construction and Operation of Dams, Oslo 1986, Norwegian University Press. 132 p., ISBN 82–00–36158–6.

Tsytovich,N.A. 1975.The mechnanics of frozen ground, Washington D.C., Scripta Book Company. 426 p.

Vesihallitus 1984. Hydrologiset havainto– ja mittausmenetelmät. Vesihallituksen julkaisuja 47. Helsinki 1984. 88 s.,ISBN 951–46–7491–X, ISSN 0355–9297.

Viljas, P. 1993. Masuunihiekan lämpötekniset ominaisuudet, diplomityö, Oulun yliopisto, Rakentamistekniikan osasto. 74 s.

Watzinger, A., Kindem, E. og Michelsen, B. 1965. Masseutskiftningsmaterialer for teleforbygning på vei og jernbane, Varmetekniske undersøkelser, Norges Geotekniske Institut, Oslo. 162 s.

Wong, L.C. & Haug, M.D. 1991. Cyclical closed–system freeze–thaw permeability testing of soil liner and cover materials, Canadian Geotechnical Journal, vol. 28, number 6, December 1991. pp. 784–793.

Vattenfall, 1988. Jord– och stenfyllningsdammar, Stockholm, Happy Printing AB, 242 s. , ISBN 91–7186–271–7.

VTT 1993 , Pakkasmääräkartat ilmastotilaston 1961 – 1990 perusteella, VTT, Tie–, Geo– ja Liikennetekniikan laboratorio, julkaisematon. Viitteenä keskustelu Saarelainen ja Kuusiniemi.

Vähäaho, J. & Ryhänen, H. 1989. Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto. Geoteknisen osaston tiedote 50. 124 s. ISSN 0359–2324, ISBN 951–771–892–6.