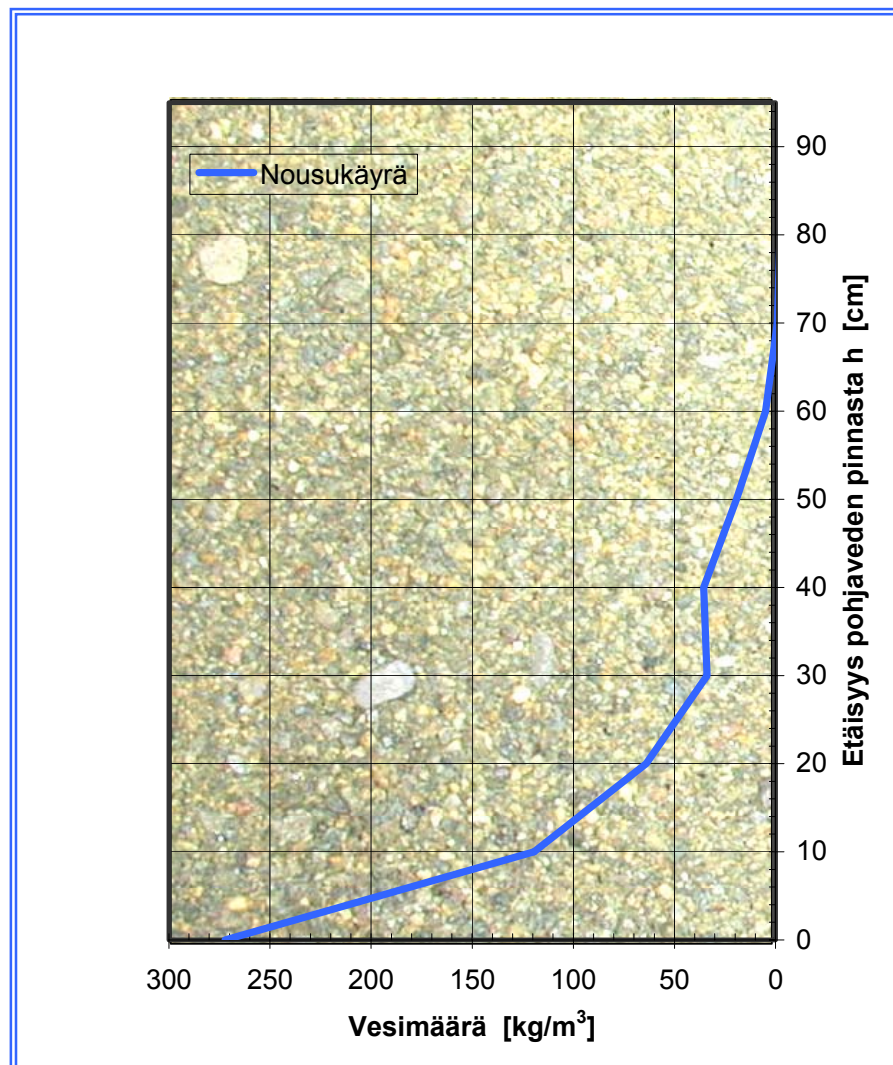
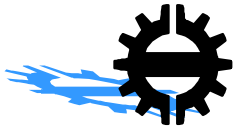


Virpi Leivo – Jukka Rantala

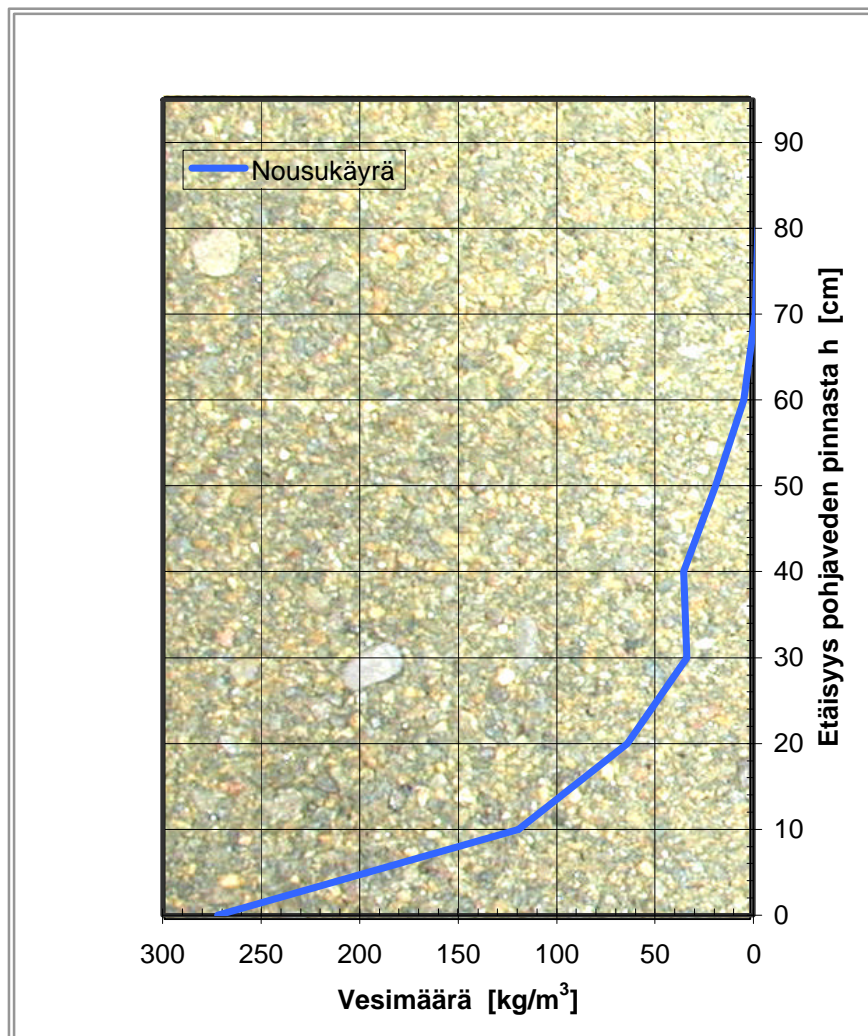
MAANVARAISTEN ALAPOHJARAKENTEIDEN KOSTEUSKÄYTTÄYTYMINEN





Virpi Leivo – Jukka Rantala

MAANVARAISTEN ALAPOHJARAKENTEIDEN KOSTEUSKÄYTTÄYTYMINEN



UDK 699.82

692.5

ISBN 952-15-0514-1

ISBN 978-952-15-2710-4

ISSN 1237-1483

Alkusanat

Julkaisu Alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen on tutkimushankekokonaisuuden Alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen ensimmäisen tutkimusvaiheen lop puraportti. Tutkimus on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun Talonrakennustekniikan ja Geotekniikan laboratorioden yhteistyönä. Julkaisun tavoitteena on selvittää maanvaraisiin alapohjarakenteisiin pohjamaasta aiheutuvia lämpötila - ja kosteusrasituksia, joita säätelevät sekä maamateriaaliin liittyvät ominaisuudet (raekoko ja -muoto sekä tiiviys) että lämpötilan, veden- ja höyrynosapaineiden muutokset.

Maanvaraisille alapohjarakenteille ympäröivästä maasta tulevia lämpö - ja kosteusrasituksia tarkastellaan teoreettisesti kirjallisuusselvityksin, numeerisin mallinnuksin ja laskelmin. Laboratoriokokeilla on selvitetty yleisimpien luonnon täyttö - ja salaojamateriaalien tasapainokosteuskäyriä hygroskooppisella ja kapillaarisella alueella sekä määritetty kapillaarista nousunopeutta sekä pysty - että vaakasuuntaan. Lisäksi julkaisussa esitellään alapohjarakenteiden kenttäolosuhteisiin soveltuva lämpötilan ja kosteuden mittausteisto.

Julkaisu on laadittu professori Ralf Lindbergin ja professori Jorma Hartikaisen johdolla. Julkaisu on tutkimushankekokonaisuuden Alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen ensimmäisen tutkimusvaiheen loppuraportti. Julkaisun ovat kirjoittaneet tutkija Jukka Rantala ja tutkija Virpi Leivo. Tutkimuksen rahoittajina ovat olleet Teknologian kehittämiskeskus TEKES sekä Lohja Rudus Oy, NCC Finland Oy, Helsingin kaupungin Geotekninen osasto ja HKR-Rakennuttajat.

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat:

Harri Mäkelä	Innogeo Oy, johtoryhmän puheenjohtaja
Pentti Lumme	Lohja Rudus Oy
Anssi Suomalainen	NCC Finland Oy
Osmo Korhonen	Helsingin kaupungin Geotekninen osasto
Kirsi Torikka	HKR-Rakennuttajat
Lasse Pöyhönen	TEKES
Ralf Lindberg	Tampereen teknillinen korkeakoulu
Jorma Hartikainen	Tampereen teknillinen korkeakoulu
Jukka Rantala	Tampereen teknillinen korkeakoulu
Virpi Leivo	Tampereen teknillinen korkeakoulu, sihteeri.

Kiitämme rahoittajia ja kaikkia projektiin osallistuneita heidän työpanoksestaan.

Tampereella 13.11.2000

Kirjoittajat

Tiivistelmä

Pohjamaa sekä yläpuoliset täyttö - ja salaojituskerrokset ovat maarakeiden välisten huokosten muodostaman enemmän tai vähemmän yhtenäisen onkaloverkoston kautta jatkuvassa yhteydessä kosteuslähteeseen eli pohjaveteen. Kosteuden liikkumista siinä säätelevät sekä maamateriaalin liittyvät ominaisuudet (raekoko ja -muoto ja tiiviys) että lämpötilan, veden - ja höyrynosapaineen muutokset.

Tutkituilla luonnonkiviaineisilla salaojatorilla ja hiekoilla materiaaliin sitoutui vettä hygrooskooppisesti RH 100% alle 0,5 paino-%, kun kuivan materiaalin annettuihin kastui. Vastaavasti moreeniin sitoutui noin 0,8 paino-%. Maamateriaaleilla on melko voimakas hystereesi-ilmiö, jonka vuoksi materiaalien tasapainokosteudet ovat jonkin verran suurempia, jos märän materiaalin annetaan kuivua RH 100%:ssa.

Tutkituilla maamateriaaleilla korkein kapillaarinen nousukorkeus oli hiekkamoreenilla, jonka lopullinen nousukorkeus oli selvästi yli kokeessa mitatun nousun eli $> 0,7$ m. Fillerin (hienon hiekan) kapillaarinen nousukorkeus on noin 0,6 m ja karkean hiekan $h \approx 0,25$ m. II luokan salaojatoran $h \approx 0,5$ m eli korkeampi kuin karkean hiekan, koska tutkitun näytteen hienoainespitoisuus oli selvästi suurempi. Laboratoriossa pestyn I luokan salaojatoran, jonka hienoainespitoisuus oli lähes 0, kapillaarista nousukorkeutta ei voitu pienen vuoksi mitata, silmämääräisesti se oli noin 5 cm. Materiaalin kapillaarisesti nostama vesimäärä riippuu materiaalin huokosluvusta. Suurimman vesimäärän vesilähteen pinnasta nosti filleri, jonka huokosluku suoritetuissa mittauksissa oli suurin $e = 0,6$ ja jossa vettä kuljettavia huokoskanavia näin ollen myös on runsaasti. Moreenin kuljettama vesimäärä on selvästi filleriä pienempi, mikä johtuu materiaalin huomattavasti pienemmästä huokosluvusta $e \approx 0,3$.

Vaakasuntaista kapillaarisuutta tutkittiin kapillaarisen rintaman etenemänopeuden ja siirtyvän vesimäärän suhteen. I luokan salaojatorassa ja sepelissä ei havaittu vaakasuntaista kapillaarista veden etenemistä. Hiekoilla ja II luokan salaojatoralla ei kapillaarisessa etenemänopeudessa havaittu suuria eroja. Rintaman etenemänopeus koko tutkitun 1 m pituisen näytteen päähän asti oli noin 0,35 m/h. Hiekkamoreenissa, jossa veden liikettä hidastaa oleellisesti pienten huokosten aiheuttama virtausvastus, rintaman eteneminen oli selvästi hitaampaa kuin karkeampirakeisissa materiaaleissa. Kaikkien materiaalien osalta havaittiin selvä yhteys materiaalin huokosluvun ja vaakasuntaisesti kapillaarivoimien vaikutuksesta siirtyvän veden määrän välillä.

Numeeristen mallinnusten perusteella 100 mm polystyreenilevyllä eristetyin maanvaraisen laatan alla eristeen eri puolilla on vielä 15 vuoden lämpökuorman jälkeen 3...4 Celsius-asteen lämpötilaero. Alapohjarakenteessa tapahtuva diffuusio riippuu rakenteen eri puolilla olevista vesihöyryn osapaine-eroista, jotka taas riippuvat lämpötilasta. Stationääritilan laskelmien mukaan tavanomaisimmat maanvaraiset alapohjarakenteet toimivat diffuusion kannalta moitteettomasti kun rakenteen alapuolisen maan lämpötila on alle +20 °C rakennuksen sisälämpötilan ollessa ympäri vuoden noin +20 °C. Maapohjan lämpötilan noustessa alapohjarakenteen läpi ylöspäin suuntautuva diffuusiovirta kasvaa. Vastaavasti riski kosteuden tiivistymiselle rakenteeseen tai yksittäisten materiaalien kriittisen kosteuspitoisuuden ylittymiselle suurenee. Alapohjarakenteessa on vesihöyryn tiivistymisriski, jos maan lämpötila nousee yli +20 °C sisälämpötilan ollessa +20 °C. Näin suuri maan lämpeneminen on mahdollista jos rakenteessa ei ole lainkaan lämmöneristystä tai pintaalaltaan laajoissa laatoissa, joissa laatan keskialueella ei ole lämmöneristystä, tai jos laatan alla maassa kulkee lämpöputkia.

Keskeisimmät lähtökohdat suunniteltaessa uusia alapohjarakenteita ja kehitettäessä rakenteiden korjausmenetelmiä ovat: alapohjarakenteiden alla oleva salaojakerros on aina kostea (lähtökohtana tulee olettaa RH 100%), maapohja alapohjarakenteen alla ei saa lämmitä merkittävästi ylöspäin sisätilaan suuntautuvan diffuusion aiheuttaman vesihöyryn suuren kosteuspitoisuuden tai tiivistymisriskin vuoksi ja maanvaraisen alapohjarakenteen tulee pystyä haihduttamaan maasta mahdollisesti nouseva kosteus.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
TIIVISTELMÄ	II
1 JOHDANTO	6
1.1 TUTKIMUKSEN TAUSTA.....	6
1.2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	6
2 VEDEN ESIINTYMINEN MAASSA JA ALAPOHJIEN KOSTEUSLÄHTEET.....	7
2.1 VEDEN MIKROKIERTO.....	7
2.1.1 <i>Pintavesi</i>	8
2.1.2 <i>Vajovesi eli gravitaatiovesi</i>	8
2.1.3 <i>Kapillaarivesi</i>	8
2.1.4 <i>Pohjavesi</i>	9
3 MAAN TEOREETTINEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSKÄYTTÄYTYMINEN	10
3.1 KOSTEUDEN SITOUTUMISMUOTOJA ERI FAASEISSA	10
3.1.1 <i>Kemiallinen sitoutuminen</i>	10
3.1.2 <i>Adsorptio</i>	10
3.1.3 <i>Kapillaarinen sitoutuminen</i>	13
3.1.4 <i>Osmoottinen sitoutuminen</i>	19
3.1.5 <i>Sitoutumaton vesihöyry</i>	19
3.2 KOSTEUDEN SIIRTYMISMUOTOJA ERI FAASEISSA	19
3.2.1 <i>Veden painovoimainen siirtyminen</i>	20
3.2.2 <i>Kosteuskonvektio</i>	20
3.2.3 <i>Diffuusio</i>	21
3.2.4 <i>Kapillaarinen kosteuden siirtyminen</i>	22
3.2.5 <i>Yhtäaikainen diffuusio ja kapillaarinen liike</i>	23
3.3 MAAMATERIAALIN OMINAISLÄMPÖKAPASITEETTI JA LÄMMÖNJOHTAVUUS	24
3.4 YHTEENVETO	30
4 ALAPOHJARAKENTEIDEN RAKENTAMISTA SUOMESSA SÄÄTELEVÄT MÄÄRÄYKSET JA OHJEET	31
4.1 RAKENNUSMÄÄRÄYSKOKOELMAN OSA C2 (KOSTEUS. MÄÄRÄYKSET JA OHJEET 1998.) 31	
4.2 RAKENNUSTEN VEDEN- JA KOSTEUDENERISTYSOHJEET RIL 107-2000.....	32
4.3 POHJARAKENNUSOHJEET RIL 121-1988	33
4.4 RAKENNUSTEN JA TONTTIALUEIDEN KUIVATUS RIL 126-1979.....	33
4.5 RT-KORTISTON MALLIT	37
4.6 YHTEENVETO	39
5 ALAPOHJARAKENTEIDEN ANALYYTTINEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSKÄYTTÄYTYMINEN	40
5.1 LÄMPÖKÄYTTÄYTYMISEN NUMEERINEN MALLINNUS.....	40
5.1.1 <i>Mallin verifointi</i>	40
5.1.2 <i>Lämpökäyttäytymisen numeerinen mallinnus</i>	43
5.1.3 <i>Yhteenveto numeerisista mallinnoista</i>	58

5.2	ALAPOHJARAKENTEIDEN LÄMPÖTILA- JA DIFFUUSIOLASKELMAT	
	STATIONÄÄRITILASSA	61
5.2.1	<i>Laskelmissa käytetyt kaavat</i>	61
5.2.2	<i>Laskelmissa käytetyt materiaaliarvot</i>	62
5.2.3	<i>Laskelmissa käytetyt rakenteet</i>	63
5.2.4	<i>Tulokset ja niiden tarkastelu</i>	64
5.2.5	<i>Johtopäätökset</i>	69
5.3	EMPIIRISESTI MITATTUJA ALAPOHJARAKENTEIDEN LÄMPÖTILOJA JA KOSTEUKSIA	70
5.3.1	<i>CASE 1: Terveysaseman vuodeosaston laajennusosa</i>	70
5.3.2	<i>CASE 2: Koulun alapohja/ liikuntasali</i>	72
5.3.3	<i>CASE 3: Koulukeskus</i>	73
5.3.4	<i>CASE 4: Museon kellaritilojen lattiat</i>	74
5.3.5	<i>CASE 5: Koulun maanvarainen alapohja</i>	75
5.3.6	<i>CASE 6: Koulurakennuksen kellaritilojen lattiat</i>	76
5.3.7	<i>CASE 7: Market-rakennuksen maanvarainen laatta</i>	77
5.3.8	<i>Yhteenveto</i>	77
6	LABORATORIOKOE OHJELMA	79
6.1	TUTKITTAVAT TÄYTTÖ- JA SALAOJITUSMATERIAALIT	79
6.2	HYGROSKOOPPINEN TASAPAINOKOSTEUS.....	83
6.2.1	<i>Yleistä hygroskooppisen tasapainokosteuden määrittämisestä</i>	83
6.2.2	<i>Hygroskooppisen tasapainokosteuden määrittäminen</i>	83
6.3	KAPILLAARISEN NOUSUKORKEUDEN MÄÄRITTÄMINEN	85
6.3.1	<i>Yleistä kapillaarisen nousukorkeuden määrittämisestä</i>	85
6.3.2	<i>Kapillaarisuuden määrittäminen pysty- ja vaakasuunnassa</i>	86
6.4	TULOKSET.....	88
6.4.1	<i>Hygroskooppiset tasapainokosteuskäyrät</i>	88
	<i>Kapillaariset tasapainokosteuskäyrät</i>	98
6.4.2	<i>Vaakasuuntainen kapillaarisuus</i>	102
6.5	YHTEENVETO	104
7	KOSTEUDEN SIIRTYMISEN MITTAUSLAITTEISTO.....	110
7.1	VESIPITOISUUDEN MITTAUSMENETELMÄT	110
7.1.1	<i>Leikkaus - kuivatus - punnitus –menetelmä</i>	110
7.1.2	<i>Sähköiset menetelmät</i>	110
7.1.3	<i>Gamma-säteilyn vaimentuminen</i>	111
7.1.4	<i>Neutroni radiografia</i>	111
7.1.5	<i>Atomien magneettinen resonanssi</i>	111
7.1.6	<i>Tietokonetomografia</i>	112
7.1.7	<i>Mikroaalto säteily</i>	112
7.1.8	<i>Lämmönjohtavuus</i>	112
7.1.9	<i>Lämpökuvaukset</i>	112
7.2	KEHITETTY MAAN LÄMMÖNJOHTAVUUTEEN PERUSTUVA MITTAUSMENETELMÄ.	113
8	MAAN KOSTEUSRASITUS MAANVARAISILLE ALAPOHJARAKENTEILLE...	117
	LÄHDELUETTELO.....	120

KÄSITTEITÄ

Diffuusio (vesihöyryn diffuusio) tarkoittaa kaasuseoksessa (esim. ilma) vakiokokonaispaineessa tapahtuvaa vesihöyrymolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksen höyrypitoisuus- tai höyryn osapaine -erot. Diffuusiossa kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta alempaan pitoisuuteen.

Gravitaatiovesi, kts. vajovesi.

Huokoisuus tarkoittaa maan huokostilavuuden ja kiinteän maa -aineoksen tilavuuden suhdetta prosentteina ilmaistuna, n .

Huokosluku tarkoittaa maan huokostilavuuden ja kiinteän maa -aineoksen tilavuuden suhdetta, e .

Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa sitä kosteuspitoisuutta, joka stationääritilassa sitoutuu huokoiseen aineeseen ympäristön tietyssä suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa. Sitoutumismekanismi voi olla adsorptio tai kapillaarikondenssi.

Hygroskooppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.

Kapillaarikondenssi on ilmiö, jossa vesimolekyylit sitoutuvat aineen huokosten muodostaman kapillaariputkiston reunoille kunnes yhtenäinen huokosputkisto katkeaa ja ohuimmalle kohdalle muodostuu meniski.

Kapillaarinen tasapainokosteus tarkoittaa vesipitoisuutta, jonka huokoinen materiaali saavuttaa ollessaan yhteydessä vapaaseen vedenpintaan kapillaarivoimien vaikutuksesta. Kapillaarinen tasapainokosteus ilmaistaan yleensä kapillaarisen nousukorkeuden tai huokosalipaineen funktiona.

Kapillaarisuus tarkoittaa ominaisuutta, jonka avulla huokoinen aine kykenee imemään nestettä vapaan nestepinnan yläpuolelle ja pitämään sen siellä.

Kapillaarivesi on maamassaan pintajännitysvoimien vaikutuksesta pohjaveden pinnan yläpuolelle nousutta vettä.

Kapillaarivirtaus tarkoittaa huokosalipaineen paikallisten erojen aiheuttamaa nesteen siirtymistä huokosissa.

Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteissa vedeksi tai jääksi kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut kyseisessä kohdassa kyllästyskosteuden ($RH=100\%$). Kondensoitumista tapahtuu yleensä materiaalien rajapinnoissa.

Kosteus tarkoittaa kemiallisesti sitoutumatonta vettä kaasumaisessa, nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa.

Kosteuskonvektio tarkoittaa vesihöyryn siirtymistä ilman paine-erojen aiheuttaman ilmavirran mukana.

Kosketuskulma tarkoittaa molekyyli-tason vetovoimien aiheuttamaa nestepinnan ja huokosen kiinteän seinämän välistä kulmaa

Kosteuspitoisuus, kts. vesipitoisuus.

Kuivatus on vesien johtamista päällysrakenteen pinnalta pintakuivatuksella tai maan sisällä salaojin ja salaojituserroksin.

Kyllästysaste tarkoittaa veden täyttämän huokostilavuuden suhdetta kokonaishuokostilavuuteen prosentteina ilmaistuna, S_r [%].

Kyllästyskosteus ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden, joka ilmaan mahtuu tietyssä lämpötilassa.

Maanvastaisella tarkoitetaan maarakennetta vastaan olevaa rakennusosaa erittelemättä sitä, siirtääkö rakennusosa kuormia maarakenteelle. Esimerkiksi kantava alapohja, joka on kosketuksissa alapuolisen salaojituskerroksen kanssa, on maanvastainen.

Maanvaraisella tarkoitetaan rakennusosaa, joka siirtää kuormia alapuolisella maarakenteelle. Maanvarainen rakennusosa on aina myös maanvastainen.

Meniski on nesteen ja huokosputken seinämien välisen kosketuskulman ja nesteen pintajännitysvoimien vaikutuksesta muodostuva kaareva nestepinta.

Pakkasmäärä lasketaan ilman vuorokautisista keskilämpötiloista. Pakkasmäärän suuruus on jäätympisteiden ja pakkaskauden aikaisten vuorokausikeskilämpötilojen erotuksen summa (Kh).

Pintavesi on maanpinnalla olevaa, maanpintaa pitkin virtaavaa tai katolta tulevaa vettä.

Pohjavesi on vettä, joka on täysin kyllästännyt maa - tai kalliovyöhykkeen. Vesi voi olla myös paineellista.

Rakeisuuskäyrä ilmaisee, miten suuri suhteellinen osuus, prosentteina ilmaistuna, tutkittavassa maalajissa on tiettyä rae kokoa pienempiä rakeita, eli miten suuri on tätä raekokoa vastaavan seulan läpäisyprosentti.

Rakennuskosteus tarkoittaa rakennusvaiheen aikana tai sitä ennen rakenteisiin tai rakennusaineisiin joutunutta rakennuksen käytönaikaisen tasapainokosteuden ylittävää kosteutta, jonka tulee poistua.

Routa on maassa (maan huokosissa) olevan veden jäätyneen takia kovettunut (jääntynyt) maakerros.

Routaantumisen on maassa olevan veden jäätymistä eli maan jäätymistä.

Routasyvyys (roudan syvyys) on roudan alapinnan etäisyys maanpinnasta.

Salaojituskerros tarkoittaa maaperän kuivattamiseksi pintamaan alle tehtyä vettä johtavaa rakennetta tai karkearakeista maa -aineskerrosta, jota pitkin vesi voi siirtyä kuivatettavalta alueelta valumalla tai pumppaamalla.

Salaojajärjestelmä tarkoittaa salaojaputkien, salaojituskerrosten, salaojakaivojen, tarkastusputkien ja kokoojakaivojen muodostamaa sekä tarvittaessa padotusventtiiliä tai pumppauksella varustettua järjestelmää rakennuksen pohjan tai vastaavan kuivattamiseksi.

Salaojaputki tarkoittaa salaojituskerroksessa käytettävää putkea, johon vesi pääsee ympäristöstä putken seinämässä olevien reikien kautta.

Suhteellinen kosteus, ilman suhteellinen kosteus (RH) ilmoittaa kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyspitoisuuteen verrattuna tietyssä lämpötilassa.

Stationääritila (=jatkuvuustila) tarkoittaa tilaa, jossa systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Stationääritilassa lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.

Tiiviysasteella tai sullonta -asteella määritetään maa -aineen tiiviyyttä suhteessa sen tiiveimpään mahdolliseen sullontatilaan. Tiiviysaste annetaan maa -aineen

kuivatilavuuspainon suhteena kuivatilavuuspainoon tiiveimässä tilassa prosentteina ilmaistuna, D [%].

Vajovesi on painovoiman vaikutuksesta maanpinnalta hitaasti alaspäin liikkuvaa vettä.

Valuma-alue on maanpinnan korkeussuhteiden perusteella määritetty alue, jolta pintavedet virtaavat alueen alimpaan kohtaan.

Vedeneristys tarkoittaa ainekerrosta, joka saumoineen kestää jatkuvaa kastumista ja jonka tehtävä on estää nestemäisen veden haitallinen tunkeutuminen rakenteeseen painovoiman vaikutuksesta tai kapillaarivirtauksena, kun rakenteen pinta kastuu.

Vedenpaineeneristys tarkoittaa ainekerrosta, joka saumoineen ja tukirakenteineen kestää jatkuvaa vedenpainetta ja jonka tehtävä on estää nestemäisen veden haitallinen tunkeutuminen rakenteeseen vedenpaineen vaikutuksesta.

Vesihöyry tarkoittaa vettä kaasumaisessa olomuodossa.

Vesihöyryn diffuusio, kts. diffuusio.

Vesihöyryn konvektio tarkoittaa kaasuseoksen (esim. ilma) sisältämän vesihöyryn siirtymistä kaasuseoksen mukana sen liikkeessä kokonaispaine-eron vaikutuksesta. Konvektio syntyy ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio) tai lämpötilaeron (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta.

Vesihöyrynläpäisevyys ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen kun ainekerroksen eri puolilla olevien tilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen.

Vesihöyrynvastus tarkoittaa tasapaksun ainekerroksen tai tällaisista muodostuvan tasapaksun kerroksellisen rakenteen pinnoilla eri puolilla vallitsevien vesihöyrypitoisuuksien tai vesihöyryn osapaineiden ero ja ainekerroksen tai rakenteen läpi jatkuvuustilassa pinta-alayksikköä kohti diffuntoituvan vesihöyryvirran suhteen.

Vesihöyrypitoisuus ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyrymäärän. Vesihöyrypitoisuuksien ero pyrkii tasoittumaan diffuusiolla.

Vesipitoisuus tarkoittaa maa-aineksessa olevan veden massan ja kuivan maa-aineksen massan suhdetta prosentteina ilmaistuna, w [%].

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen ja etenkin siihen liittyvät ongelmat kosteus - ja homevaurioiden muodossa ovat viime aikoina olleet näkyvästi esillä julkisessa keskustelussa. KTL:n tutkimusten mukaan noin 25% kerros - ja pientaloja on alapohjissa jonkin asteisia kosteusvaurioita. Karkeasti arvioiden vaurioiden korjauskustannukset tulevat olemaan yli 3 mrd. mk.

Maanvaraisissa alapohjissa kosteusvaurioita aiheuttavat yleisimmin täytemaan kapillaarisuudesta johtuva kosteuden nousu alapohjarakenteeseen ja maapohjan lämpenemisestä johtuva hygroskooppisen kosteuden tiivistyminen alapohjaan. Ryömintätalaisissa tuuletetuissa alapohjissa kosteusongelmien syynä on usein ryömintätilan huono tuuletus yhdistettynä maasta diffuusiolla nousevaan kosteuteen ja pintavesien pääseminen ryömintätilaan.

Lukuisia rakennusten kosteusvaurioita tutkittaessa on käynyt selvästi ilmi, että alapohjarakenteet eivät kosteus - ja lämpötekniisesti toimi suunnitellulla tavalla. Rakenteen kosteustekninen toiminta muuttuu maapohjan lämpenemisen seurauksena. Tämä ongelma ilmenee pinta-alaltaan suurissa lattioissa ja lattioissa, joissa alapohjarakenne lämpenee joko tarkoituksellisesti lattialämmityksellä tai tarkoituksettomasti esim. putkivientien vuoksi. Lisäksi kuivuvan laatan liian varhainen pinnoittaminen estää rakennekosteuden poistumista.

Salaojatorassa tapahtuva diffuusio ja pohjamaan kapillaariveden nousunopeus eri maalajeilla ovat puutteellisesti tutkittuja. Samoin maassa tapahtuva vaakasuuntainen kapillaarisuus, joka alapohjien kosteusteknisen käyttäytymisen yhteydessä on oleellisesti vesipitoisuutta määrittävä tekijä. Rakeisen maan aineksen kosteusteknisen käyttäytymisen tunteminen lämpötilan muuttuessa on kuitenkin toimivien rakenneratkaisujen kehittämisen kannalta ehdottoman välttämätöntä.

Alapohjarakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteiden määrittämiseen ei ole olemassa kenttäolosuhteissa käytettäväksi soveltuvia menetelmiä tai mittauslaitteistoja.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen –tutkimuksen tavoitteena oli selvittää maan lämpötila- ja kosteuskäyttäytymistä, arvioida minkä suuruisia kosteusrasituksia kostea pohjamaa aiheuttaa alapohjille sekä kehittää näihin liittyviä mittausmenetelmiä.

Maan lämpö- ja kosteusteknistä käyttäytymistä pyrittiin selvittämään teoreettisesti kirjallisuustutkimuksen, numeeristen mallinnusten ja laskelmien avulla. Numeerisissa mallinuksissa ja laskelmissa rajoituttiin tarkastelemaan maanvaraisia alapohjarakenteita.

Laboratoriokokeilla pyrittiin selvittämään erilaisten täyttö - ja salaojitusmateriaalien tasapainokosteuskäyriä hygroskooppisella ja kapillaarisella alueella, sekä määrittämään kapillaarista nousunopeutta sekä pysty- että vaakasuunnassa.

Lisäksi pyrittiin kehittämään laitteisto ja mittausten menetely alapohjarakenteen lämpö - ja kosteusolosuhteiden määrittämiseen yhtenäisenä rakenteena kenttäolosuhteissa.

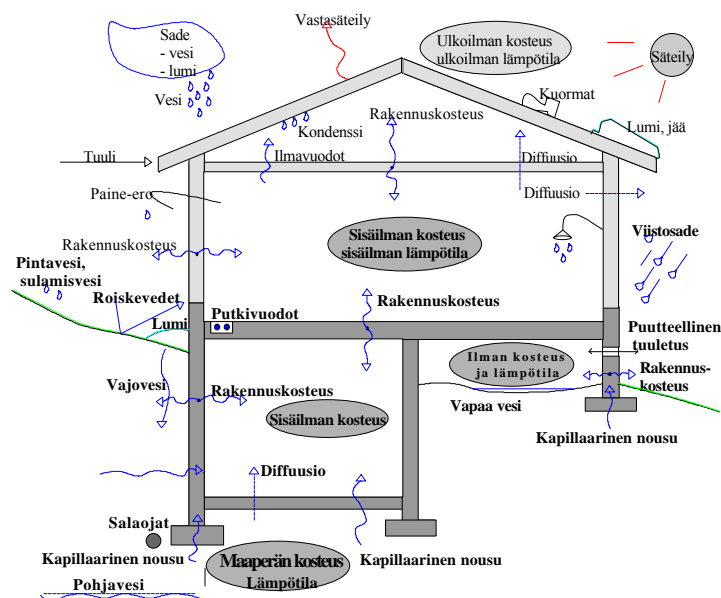
2 Veden esiintyminen maassa ja alapohjien kosteuslähteet

Rakennusten alapohjien, kuten muidenkin rakennusosien kosteuslähteet voidaan jaotella kolmeen kategoriaan: rakennuksen ulkoisiin ja sisäisiin kosteuslähteisiin sekä itse rakenteissa olevaan rakennekosteuteen. Alapohjien kosteustasapainoon vaikuttavat rakennuksen sisäiset kosteuslähteet ovat samat kuin muitakin rakennusosia käsiteltäessä: ihmisten aineenvaihdunta, märkätilojen, kuten saunojen ja kylpyhuoneiden käyttövedet, keittiövedet, pyykin kuivatus, putkivuodot, kasvillisuus, haihduttavat vapaat vesipinnat jne. Myös rakennekosteus ja sen lähteet ovat tunnettuja rakennusmateriaaleihin liittyviä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi tuoreesta betonista tai puusta haihtuva kosteus.

Muista rakennusosista poiketen alapohjat ovat joko kokonaan tai osittain kosketuksissa luonnontilaisen maan tai erillisen rakennetun maan aineskerroksen, kuten salaoituskerroksen kanssa. Tästä johtuen alapohjarakenteiden ulkoinen kosteusrasitus poikkeaa huomattavasti maanpinnan yläpuolisten rakenteiden vastaavasta.

2.1 Veden mikrokierto

Veden liikkumista alapohjarakenteiden vastaisissa maakerroksissa voidaan kuvata veden mikrokiertona huokoisissa materiaaleissa. Pintaveden painovoimainen vajoaminen syvemmälle maakerrokseen, vajoveden määrän ja haihtumisnopeuden muutosten aiheuttamat pohjaveden pinnan korkeusvaihtelut sekä pohjaveden pinnasta nouseva kapillaarivesi yhdessä materiaalin huokosissa diffuusiolla liikkuvan vesihöyryn kanssa muodostavat jatkuvasti muuttuvan systeemin, jossa kosteus pyrkii liikkumaan kohti veden- ja höyrynsapaineen tasapainotilaa.



Kuva 2.1. Veden mikrokierto luonnossa.

2.1.1 Pintavesi

Pintaveden pääasiallinen lähde on sade, jonka vuotuinen sademäärä Suomessa on keskimäärin 600 mm eli $0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Alapohjan lähelle kulkeutuvan pintaveden määrään vaikuttavat sademäärän lisäksi maaston muodot, rakennuksen sijainti maastossa, kasvillisuus ja maan pintamateriaalit. Vain osa vapaasta pintavedestä, noin 20 %, painuu syvemmälle maakerrokseen, 30 % virtaa pintavetenä laskuojiin, jokiin, järviin tai mereen ja suurin osa, noin 50 %, haihtuu takaisin ilmaan suoraan maan pinnalta. Tätä vyöhykettä kutsutaan myös maanpinnan vesivyöhykkeeksi.

2.1.2 Vajovesi eli gravitaatiovesi

Gravitaatiovesi voi liikkua maassa vapaasti painovoiman vaikutuksesta. Osa vajovedestä haihtuu syvemmältä huokosista ennen pohjaveden pinnan saavuttamista ja osa kulkeutuu salaoituskerroksen ja salaojien mukana pois alapohjarakenteen mikrokierron piiristä. Tällä vajovesivyöhykkeellä oleva sitoutumaton vesi on vajoamassa alaspäin, vettä voi myös esiintyä höyrynä, kapillaarivetenä ja adsorptiovetenä.

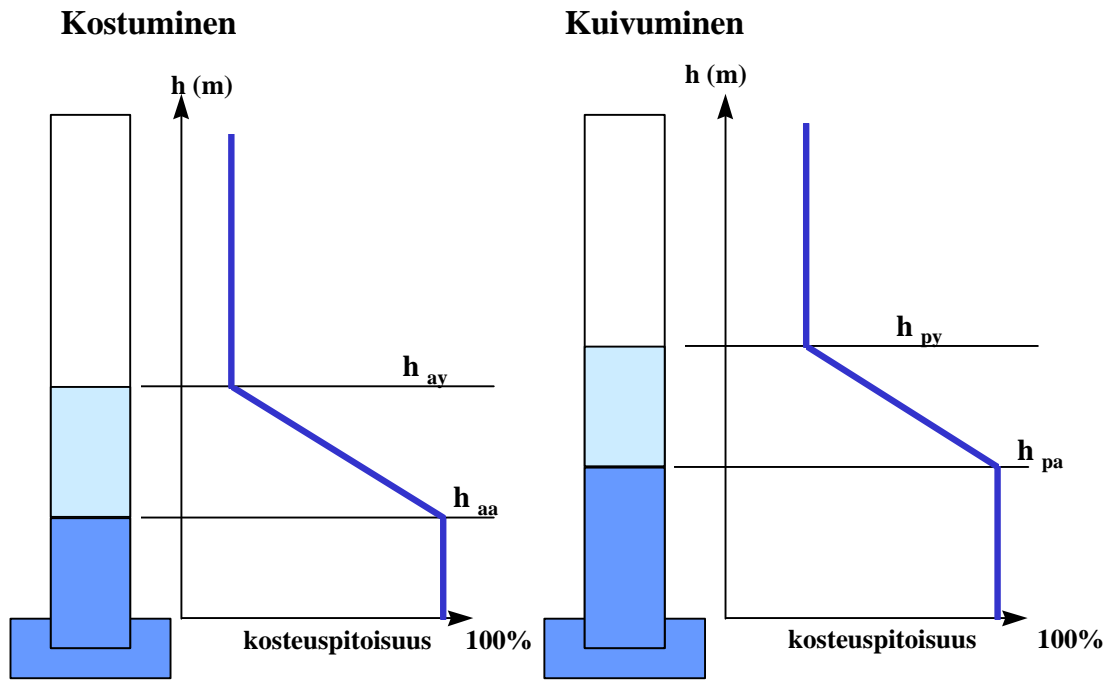
2.1.3 Kapillaarivesi

Vapaan veden lähteestä, esimerkiksi pohja- tai orsiveden pinnasta, vesi pyrkii huokoisessa materiaalissa siirtymään toisiinsa kytkettyjen huokosten muodostamassa putkistoverkossa kapillaarivoimien vaikutuksesta, joiden suuruus riippuu veden ja aineen ominaisuuksista sekä kosteuspitoisuudesta. Kapillaarista siirtymistä vastustavat kitkavoimat ja painovoima. Pohjaveden pinnasta nousevan kapillaariveden kohoaminen jatkuu tasoon, jossa kohonneeseen vesimassaan kohdistuvat kapillaarivoimat ovat tasapainossa.

Kapillaaristen voimien maan huokossysteemiin sitomaa vettä kutsutaan kapillaarivedeksi ja sen nousukorkeutta vapaan veden pinnasta kapillaariseksi nousukorkeudeksi.

Materiaalin kastuessa ja veden noustessa kapillaarisesti ilmiötä kutsutaan aktiiviseksi kapillaarisuudeksi. Vastaavasti materiaalin kastuessa ja veden laskiessa ilmiötä kutsutaan passiiviseksi kapillaarisuudeksi. Kapillaarinen nousukorkeus ei ole mikään yksi tietty arvo kullekin materiaalille vaan esimerkiksi maalajeilla voidaan erottaa neljä erisuuruista kapillaarisen nousukorkeuden arvoa (kuva 2.2):

- h_{ay} kostumisessa esiintyvä ylempi kapillaarinen nousukorkeus
- h_{aa} kostumisessa esiintyvä alempi kapillaarinen nousukorkeus
- h_{py} kuivumisessa esiintyvä ylempi kapillaarinen nousukorkeus
- h_{pa} kuivumisessa esiintyvä alempi kapillaarinen nousukorkeus.



Kuva 2.2 Kapillaarinen nousukorkeus maalajeilla kostumisessa ja kuivumisessa.

Näitä eri nousukorkeuksia ei pystytä tarkasti määrittelemään. Kapillaarisuuskokeissa silmin havaittava nousukorkeuden raja on lähinnä ylempi kapillaarinen nousukorkeus.

2.1.4 Pohjavesi

Pohjavesi, sen määrä ja pinnan korkeusasema määräytyvät pohjavesialtaaseen tulevan ja siitä poistuvan veden määrien erotuksena. Pohjaveden poistuma on jatkuvaa veden painovoimaista virtaamista pinnan alapuolisista purkautumiskohdista avovesistöihin tai suoalueille. Pohjavesialtaaseen tulevan veden määrä sen sijaan on riippuvainen sademäärästä ja edelleen pohjaveden saavuttavan vajoveden määrästä. Pohjaveden muodostumisen ja purkautumisen eriaikaisuudesta johtuen pohjaveden korkeus vaihtelee vuodenaikojen, sääolosuhteiden ja maaperän laadun mukaan. Alimmillaan pohjavesi on talven päättyessä, kun routa on kuukausien ajan estänyt veden imeytymisen pohjavedeksi. Korkeimmillaan pohjavesi on heti roudan sulamisen jälkeen. Pohjavesivyöhykkeellä maan huokostila on kokonaan vedellä kyllästynyt. Vedellä kyllästynyttä maata voi olla myös pohjaveden pinnan yläpuolella kapillaarivyöhykkeessä, jonka huokostilassa on pohjavedestä kapillaarivoimien vaikutuksesta nousutta vettä.

3 Maan teoreettinen lämpö- ja kosteuskäyttäytyminen

Pohjamaa sekä yläpuoliset täyttö - ja salaojituserrokset voidaan käsittää yhtenäisenä massana, joka maaraakeiden välisten huokosten muodostaman enemmän tai vähemmän yhtenäisen onkaloverkoston kautta on jatkuvassa yhteydessä kosteuslähteeseen eli pohjaveteen. Kosteuden liikkumista tässä huokoisessa materiaalissa säätelevät sekä maamateriaalin liittyvät ominaisuudet että veden ja höyrynsapaineen muutokset huokosverkoston sisällä. Maan materiaaliominaisuudet, kuten raekoko ja -muoto, lajitepitoisuus, humuspitoisuus ja tiiviys muodostavat huokosverkoston, jossa kosteus liikkuu painovoiman, kapillaaristen voimien, höyrynsapaineen muutosten sekä dipolisten vesimolekyyliden ja kiviainesten välisten sähköisten sidosvoimien aiheuttamassa voimakentässä. Vaikka maamassan materiaaliominaisuuksien ja huokosverkoston katsottaisiinkin pysyvän muuttumattomina ajan suhteen, muutokset vallitsevissa lämpötiloissa ja huokosyhteisiin ulottuvilla olevan vapaan veden määrässä aiheuttavat jatkuvia muutoksia alapohjien vastaisten maakerrosten kosteustasapainossa.

3.1 Kosteuden sitoutumismuotoja eri faaseissa

Kosteus voi sitoutua materiaaliin seuraavilla eri tavoilla:

1. Kemiaalisesti
2. Adsorptiolla
3. Kapillaarisesti
4. Osmoottisesti
5. Sitoutumattomana vesihöyrynä

3.1.1 Kemiaallinen sitoutuminen

Kemiaalisesti sitoutunut vesi on sitoutunut joko ioni - tai molekyylisidoksella sitoutunutta. Sidosenergia on hyvin suuri muihin sidosmuotoihin verrattuna, kuten esimerkiksi kidevedellä. Kemiaalisesti sitoutunut vesi katsotaan olevan osa materiaalia eikä sitä oteta yleensä huomioon kosteusteknisissä tarkasteluissa.

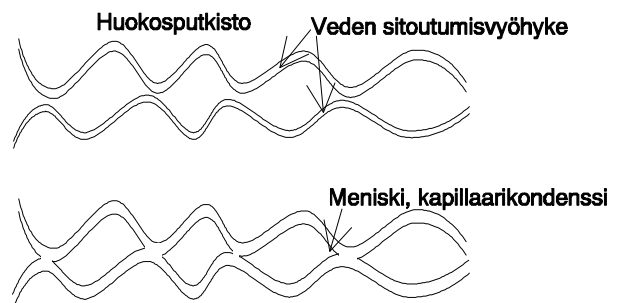
3.1.2 Adsorptio

Aine voi ottaa kosteutta suoraan ilmasta. Aineeseen ilmasta sitoutuvan veden määrä riippuu aineesta. Hygroskooppien kosteuden sitoutuminen aiheutuu aineen huokosissa vaikuttavista vetovoimista, jotka vetävät ilman vesimolekyylejä huokosten pintaan ohueksi vesikerrokseksi. Vesimolekyylin koko on n. 3,3 Å /Fukt handbok 1994/. Ilman kosteuden lisääntyessä molekyylikerroksen paksuus kasvaa ja vastaavasti ilman kosteuden vähentyessä molekyylikerros ohenee.

Vesimolekyylit sitoutuvat aineeseen joko adsorptiolla tai kapillaarikondenssilla /Absetz 1985/. Pienillä suhteellisen kosteuden arvoilla adsorptio on hallitseva ja suu rilla suhteellisen kosteuden arvoilla kapillaarikondenssi on hallitseva. Adsorptiossa vesimolekyylit kiinnittyvät materiaalin pintaan vetovoimien (van der Waalska -voimat) vaikutuksesta. Adsorptiolla aineeseen sitoutuvan kosteuden määrä riippuu ilman suhteellisen kosteuden lisäksi

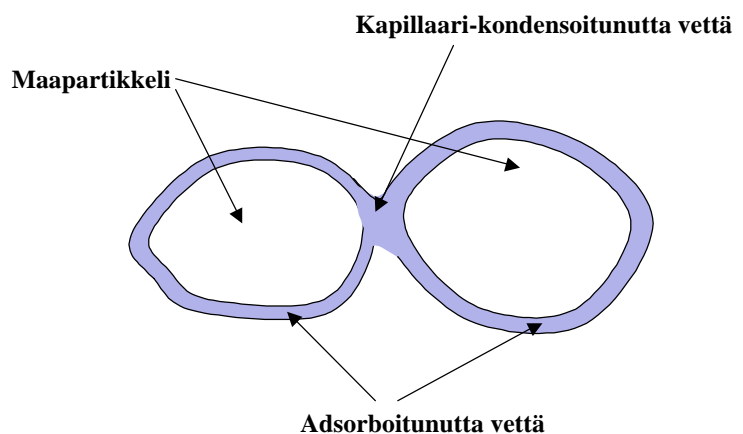
materiaalin huokosten kemiallisesta luonteesta ja materiaalin ominaispinta -alasta (pinta/tilavuus). Useilla materiaaleilla adsorptiolla on pienempi merkitys kuin kapillaarikondenssilla /Fukt handbok 1994/.

Kapillaarikondenssissa vesimolekyylit sitoutuvat aineen huokosten muodostaman kapillaariputken reunoille kunnes yhtenäinen huokosputkisto katkeaa ja ohuimmalle kohdalle muodostuu meniski (kuva 3.1). Meniskin lähellä veden osapaine on alempi kuin tasopinnan lähellä, josta syystä tapahtuu kondenssi (vrt. kapillaarinen sitoutuminen, luku 3.1.3). Kapillaarikondenssi tapahtuu alle 100%:n suhteellisessa kosteudessa. Mitä pienempiä huokokset ovat sitä alhaisemmassa suhteellisessa kosteudessa kapillaarikondenssi alkaa.



Kuva 3.1 Kapillaarikondenssi materiaalin huokosjärjestelmässä.

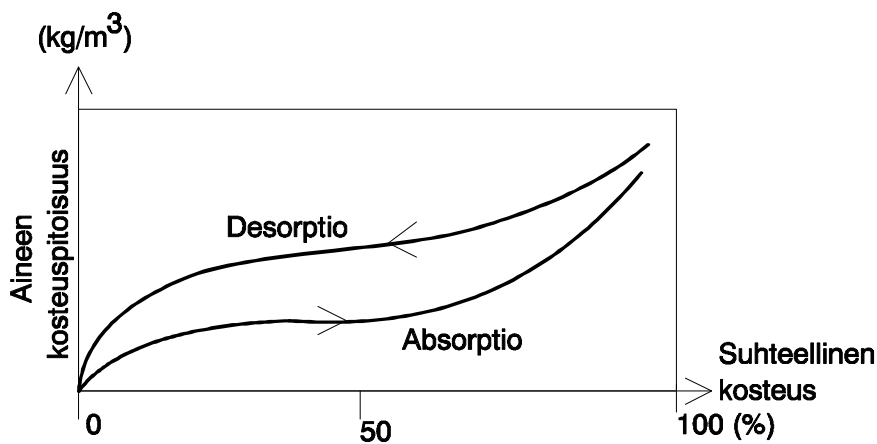
Kuvista 3.1 ja 3.2 voidaan todeta, että vesi on sitoutunut materiaaliin alle 100%:n kosteudessa kahdella eri mekanismilla: adsorptiolla ja kapillaarisuudella. Lähteessä /Hillel 1971/ todetaan, että savisilla maalajeilla sekä materiaalin pinnalle sitoutuneella vedellä että kapillaarisen meniskin muodostamalla vedellä on suuri merkitys. Vastaavasti hiekkaisilla maalajeilla adsorptio on lähes merkityksetön ja kapillaarinen sitoutuminen merkittävä.



Kuva 3.2 Kyllästymättömässä maassa olevan veden sitoutuminen /Hillel 1971/.

Hygroskooppinen tasapainokosteus

Aine saavuttaa tasapainon, tietyssä vesipitoisuuden (w) ympäristönsä kanssa. Tasapaino riippuu lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Aineen tiettyä lämpötilaa vastaava tasapainokosteuskäyrä, sorptiokäyrä voidaan määrittää muuttamalla ympäristön suhteellista kosteutta ja pitämällä lämpötila vakiona. Lähdetessä kuivasta materiaalista saadaan kastumisen tasapainokäyrä, absorptiokäyrä ja vastaavasti lähdetessä kyllästetystä materiaalista saadaan kuivumisen tasapainokäyrä, desorptiokäyrä. Tasapainokosteuskäyrässä absorptiolla ymmärretään yleensä sekä adsorptiota ja kapillaarikondenssia. (Periaatekuva tasapainokosteuskäyrästä, kuva 3.3). Eri aineilla hygroskooppinen kosteus vaihtelee huomattavasti (esim. puu n. 150 kg/m^3 ja tiili n. 30 kg/m^3).



Kuva 3.3 Tasapainokosteuskäyrä.

Tasapainokosteuskäyrästä voidaan erottaa kolme vaihetta veden sitoutumismekanismin perusteella. Ensimmäisessä vaiheessa alhaisella suhteellisella kosteudella yksittäiset vesimolekyylit sitoutuvat aineen pinnalle vetovoimien vaikutuksesta (käyrä jyrkkä). Seuraavassa vaiheessa vesimolekyyliyhymien adsorptio on hallitseva. Kolmannessa vaiheessa suhteellinen kosteus on niin suuri, että meniskien muodostuminen laajemmalla määrällä on mahdollista ja veden sitoutuminen tapahtuu pääasiassa kapillaarikondenssilla (jyrkkä käyrä). Kastumisella ja kuivumisella on yleensä erilainen tasapainokosteuskäyrä, tätä ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. Sen syytä ei tunneta tarkoin, mutta sen arvellaan osittain johtuvan (Sandberg, 1987/):

- kostuvan aineen huokosiin jää ilmaa, joiden poistuminen veteen liukenemalla on hidasta.
- aineen huokosten muodot ovat sellaisia, että kuivuminen tapahtuu kostumista merkittävästi pienemmässä ilman kosteudessa.
- tasapainokosteuksien mittauksissa käytetään liian lyhyitä tasaantumisaikoja.

Tasapainokosteuskäyrän tangentti määrittelee materiaalin kosteuskapasiteetin (ξ). Aineen kosteuskapasiteetti on suuri jos pieni suhteellisen kosteuden muutos aikaansaa suuren vesipitoisuuden muutoksen.

Kuten edellä on esitetty materiaalin tasapainokosteuskäyrä riippuu lämpötilasta. Rakennusaineille määritellyt tasapainokosteuskäyrät on yleensä määritelty +20 °C:ssa. Fukt handbok:n /Fukt handbok 1994/ mukaan tavallisilla rakennusmateriaaleilla tasapainokosteuskäyrät lämpötila-alueilla +20 ... +50 °C eivät eroa toisistaan merkittävästi. Kirjallisuudesta ei löydy viitteitä rakennusmateriaalien hygroskooppisesta tasapainokosteudesta alhaisissa lämpötiloissa.

Maalajien hygroskooppista tasapainokosteuskäyttäytymistä on tutkittu vähän. Maa-aineksen tasapainokosteuteen vaikuttaa mm:

- rakeisuus ja ominaispinta-ala
- materiaalien epäpuhtaudet: ruoste, suolat
- mineraalikoostumus (ei merkitystä suomalaisissa maissa).

Vuorelainen on esittänyt väitöskirjassaan /Vuorelainen 1960/ salaojasoran (soran kuivapaino 1700 kg/m³) tasapainokosteuskäyrän +20 °C:ssa. Käyrän mukaan 100%:n suhteellisessa kosteudessa salaojan kosteuspitoisuus on 4% soran kuivapainosta (68 kg/m³). Lähteessä /Sandberg, R. et al. 1987/ on määritelty tasapainokosteuksia täyttösoralle ja siltimoreenille +20 °C:ssa. Lisäksi samojen maalajien kosteus on määritelty -18° C:ssa ja noin 90%:n suhteellisessa kosteudessa. Tulokset on koottu taulukkoon (Taulukko 3.1). Kokeiden mukaan täyttösoran ja siltimoreenin tasapainokosteus oli alle 0,5 paino%:a eli 8 ...10 kg/m³.

Taulukko 3.1 Tasapainokosteuskokeissa saadut arvot /Sandberg et al. 1987/.

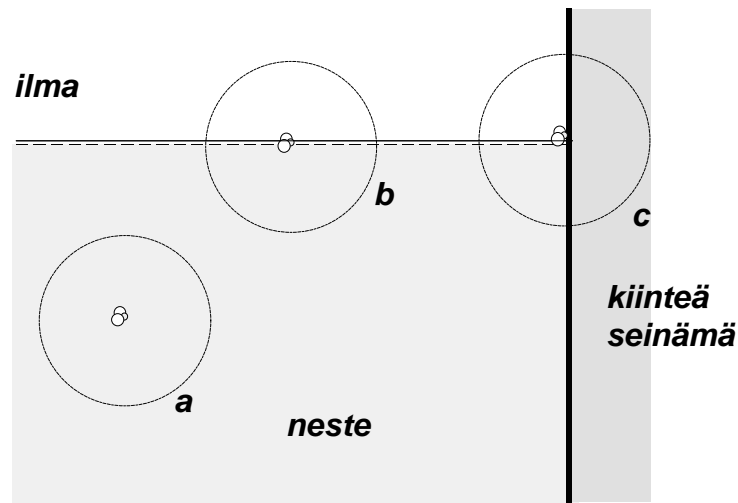
	Kosteus (promilleina) kuivapainoon verrattuna						
Lämpötila °C	+20	+20	+20	+20	+20	+20	-18
Ilman suhteellinen kosteus %	10	45	75	86	93	97	n.90
Maalaji							
Täyttösora	1,6	1,4	1,61	1,85	2,22	2,12	3,35
Siltimoreeni	1,86	1,39	1,6	3,46*	4,71	4,81	4,60
* koekappaleen kosteus ei ehtinyt tasaantua							

3.1.3 Kapillaarinen sitoutuminen

Kapillaarisuudella tarkoitetaan ominaisuutta, jonka avulla kapillaariputki tai huokoinen aine kykenee imemään nestettä vapaan nestepinnan yläpuolelle ja pitämään sen siellä.

Nesteen kapillaarisuus muodostuu molekyylien välisistä vetovoimista eli molekyylien kemiallisista potentiaaleista. Nämä vetovoimat heikkenevät nopeasti molekyylien etäisyyden kasvaessa, joten yksittäisen molekyylin vetovoimakenttä on sitä ympäröivä pienisäteinen pallo. Mikäli vetovoimakenttä on kokonaan homogeenisen nestemassan sisäpuolella, molekyylin ja sitä ympäröivien nestemolekyylien väliset vetovoimat kumoavat toisensa (kuva 3.4 a). Mikäli yksittäinen molekyyli on nesteen ja ilman rajapinnalla ja vetovoimakenttä ulottuu nestemassan ulkopuolelle, nestemassan puoleisten molekyylien aiheuttama vetovoimaresultantti molekyyliissä on suurempi kuin pinnan puoleisten johtuen vetovoimakentän sisäpuolelle jäävän molekyyliänsä epätasapainosta molekyylin eri puolilla. Mitä lähempänä rajapintaa yksittäinen molekyyli on, sitä suurempi on sitä nesteeseen

vetävä sidosvoima, koska vastavoima vastaavasti pienenee. Suurimmillaan molekyyliin kohdistuva vetovoima on sen painopisteen ollessa juuri nesteen rajapinnalla (kuva 3.4 b). Joutuessaan nestepinnan ulkopuolelle molekyyliin nestemassasta kohdistuvat vetovoimat heikkenevät nopeasti.

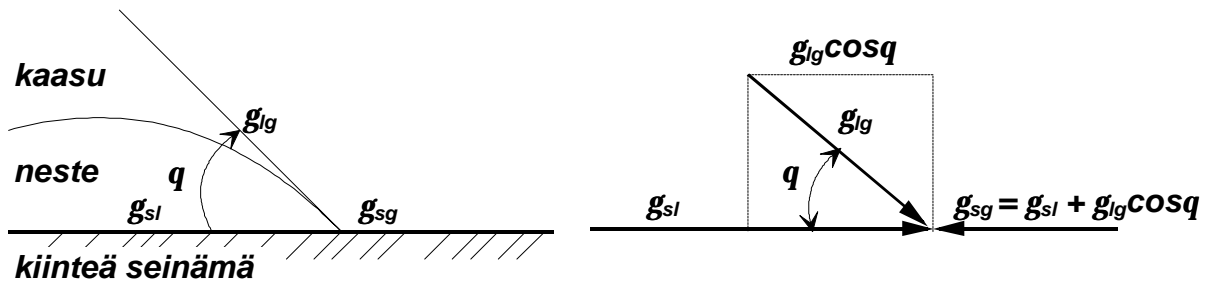


Kuva 3.4 Nestemolekyyliä ympäröivä vetovoimakenttä

Yhtenäisen massan rajapinnan muodostuminen edellyttää massan sisäisten kemiallisten sidosten katkeamista ja vierekkäisten atomien tai molekyylien liikettä. Tämä uudelleenjärjestäytyminen vaatii työtä.

Nesteen ja kaasun välisessä faasirajassa vapaa pinta-energia voidaan käsittää molekyylien kemiallisten potentiaalien muodostamana voimana pinnan pituusyksikköä kohden, joka vastustaa uuden pinnan muodostumista. Vapaata pinta-energiaa kutsutaan tässä yhteydessä yleensä pintajännitykseksi γ [N/m]. Näistä nestemassan rajapinnan molekyyliin vaikuttavista kemiallisista potentiaalivoimista johtuen nesteen pinta käyttäytyy kuin jännitetty kalvo, joka pyrkii supistumaan pienimpään mahdolliseen potentiaalienergiatasoon eli supistamaan massaa ympäröivän pinnan alan minimiin. Juuri tästä syystä neste pyrkii vapaana massana ollessaan muodostamaan pallon.

Molekyylin sijaitessa nesteen, kiinteän aineen ja ilman rajapinnassa muodostuva vetovoimakenttä poikkeaa muualla nesteen ja ilman rajapinnalla syntyvistä voimakentistä (kuva 3.4 c). Riippuen kiinteän aineen molekyylien ja nesteen molekyylien välisistä vetovoimista ja muodostuvan voimaresultantin suunnasta nestepinta asettuu tiettyyn kulmaan kiinteää seinämää vasten. Tätä molekyyliä vetovoimien aiheuttamaa nestepinnan ja seinämän välistä kulmaa kutsutaan kosketuskulmaksi (θ) (kuva 3.5). Voimaresultantin suuntautuessa nesteeseen kulman arvo on $\theta > 90^\circ$. Resultantin suuntautuessa seinämään kulman arvo on $\theta < 90^\circ$. Nesteen ja kiinteän aineen sekä kaasun välinen kosketuskulma määräytyy kaikkien faasien ominaisuuksien perusteella. Nestettä kutsutaan kostuttavaksi, mikäli sen kosketuskulma kiinteän aineen kanssa on $\theta < 90^\circ$.



Kuva 3.5 Kosketuskulman q muodostuminen liittyvien faasien välisistä pintajännityksistä.

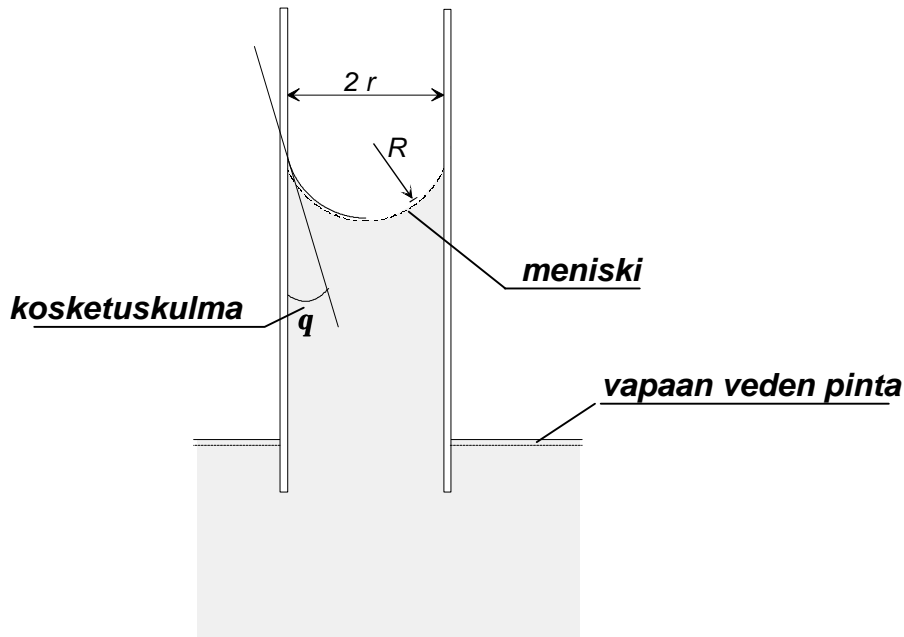
Pintajännitys vaikuttaa aina pinnan tangentin suunnassa. Kun kolmen faasin (kiinteä, neste ja kaasu, kuva 3.5 yhtymäkohdassa tunnetaan faasien välisten rajapintojen pintajännitykset (γ_{lg} , γ_{sg} , γ_{sl}), voidaan kosketuskulman θ määrittää näiden avulla kaavalla (3.1)

$$\cos q = \frac{(\gamma_{sg} - \gamma_{sl})}{\gamma_{lg}} \quad (3.1)$$

missä

- θ = nesteen ja kiinteän aineen välinen kosketuskulma [$^{\circ}$]
- γ_{sg} = kiinteän aineen ja kaasun välinen pintajännitys [N/m]
- γ_{sl} = kiinteän aineen ja nesteen välinen pintajännitys [N/m]
- γ_{lg} = nesteen ja kaasun välinen pintajännitys [N/m].

Nesteen ja kiinteän seinämän välisen kosketuskulman ollessa $\theta < 90^{\circ}$ vesipatsaan nestepinta muodostuu koveraksi (kuva 3.6) seinämän ja nesteen välisten voimien pyrkiessä kostuttamaan seinämää ylöspäin samalla kun pintajännitys pyrkii pienentämään nestepinnassa muodostuvaa vapaata pinta-energiaa minimiinsä. Nestepatsaan pinnasta muodostuu kupera supistuva kalvo eli meniski (meniskus, kreikk.: hiusputkessa olevan nesteen kupera tai kovera pinta), jonka pinnan alan pienentyessä pinnan vapaan pinta-energian määrä pienenee.



Kuva 3.6 Nesteen ja huokosputken seinämän välinen kosketuskulma ja vesipatsaan pintaan muodostuva kaareva meniski.

Fourierin yhtälön sovelluksena voidaan tarkastella koveraa nestepintaa huokosputken sisällä. Pintojen välille muodostuva paine-ero voidaan nyt esittää muodossa (3.2):

$$\Delta p = p_c = p_1 - p_2 = \mathbf{g} \cdot \frac{2 \cdot \cos \mathbf{q}}{r} \quad (3.2)$$

Syntyvä alipaine nesteen kaarevassa rajapinnassa eli huokosalipaine p_c aiheuttaa nesteen kapillaarisen imeytymisen. Huokosalipaine muuttuu suoraviivaisesti huokosessa olevan nesteen meniskin ja vapaan vedenpinnan välillä. Pystysuorassa huokosputkessa veden kapillaarista nousua vastustaa siihen kohdistuva maan vetovoima. Putkeen muodostuvan vesipatsaan hydrostaattista painetta (ρgh) voidaan pitää meniskiin kohdistuvana alaspäin suuntautuvana jännityksenä, joka kasvaa lineaarisesti nousukorkeuden kasvaessa. Veden nousu kapillaarivoimien vaikutuksesta pysähtyy, kun huokosalipaine ja hydrostaattinen paine vesipatsaan meniskin korkeudella ovat yhtä suuret (3.3):

$$p_c = \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \quad (3.3)$$

p_c	= huokosalipaine [N/m^2]
ρ	= nesteen ominaispaino [kg/m^3]
g	= gravitaatiovakio [$\approx 9,82 \text{ m/s}^2$]
h	= vesipatsaan nousukorkeus huokosputkessa [m]

Kaavojen (3.2) ja (3.3) mukaisesti saadaan huokosputkessa vapaan vedenpinnan tasosta lasketuksi kapillaarisen vesipatsaan nousukorkeudeksi h pyöreässä putkessa (3.4):

$$h = \frac{2 \cdot \mathbf{g} \cdot \cos \mathbf{q}}{r \cdot \mathbf{r} \cdot \mathbf{g}} \quad (3.4)$$

Lähteen /Permeabilitet och kapillaritet 1972/ mukaan täysin vedellä kyllästetyssä tilassa $\theta = 0$. Sijoittamalla kaavaan arvot $\gamma = 0,073 \text{ N/m}$ ja $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ ja $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, kaava supistuu muotoon (3.5):

$$h = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{r} \quad (3.5)$$

Meniskuksen nousunopeus tasasäteisessä pystysuorassa putkessa voidaan ilmoittaa kaavalla (3.6), jossa meniskuksen pinta saavuttaa korkeuden x ajan hetkellä t :

$$t = \frac{2 \cdot h}{r_0 \cdot s \cdot \cos q} \cdot x^2 \quad (3.6)$$

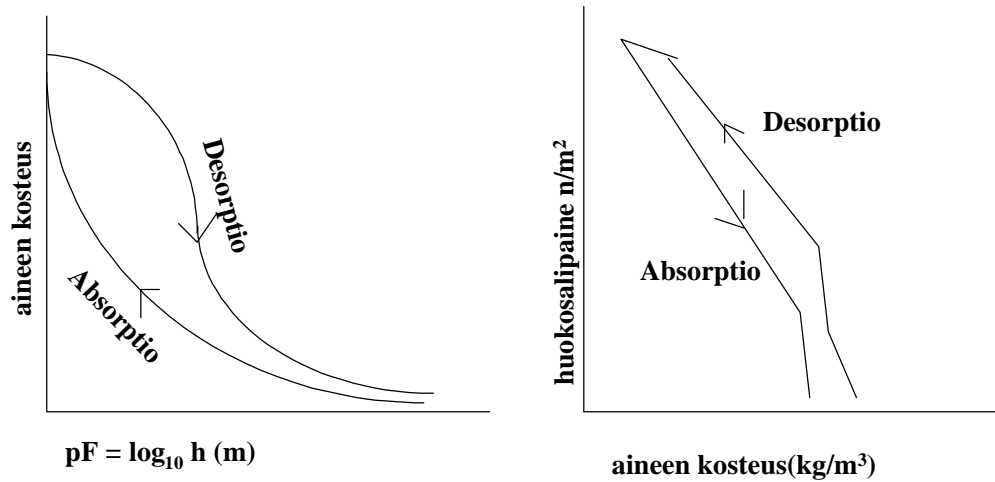
missä η on viskositeetti.

Kapillaarinen tasapainokosteus

Kapillaariseksi tasapainokosteudeksi kutsutaan sitä kosteutta, jonka huokoinen materiaali saavuttaa ollessaan yhteydessä vapaaseen vedenpintaan. Aineen kapillaarinen tasapainokosteus (w) ilmaistaan tavallisesti kapillaarisen nousukorkeuden tai huokosalipaineen (3.2) funktiona (kuva 3.7).

Kapillaarinen tasapainokosteus

a. kapillaarisen nousukorkeuden funktiona b. huokosalipaineen funktiona



Kuva 3.7 Kapillaarisen tasapainokosteuden esittäminen.

Huokoisin materiaalin huokosia voidaan pitää joukkona kapillaariputkia. Maassa kapillaariputkina toimivat rakeiden väliset huokokset. Maalajeissa huokoskanavien läpimitta tavallisesti kasvaa raekoon kasvaessa. Kapillaarisuuteen raekoon lisäksi vaikuttavat myös maalajien kerrostuminen, tiiviysaste ja lämpötila. Jos kaikkien materiaalin sisältämien kapillaarihuokosten säde on vakio r , kapillaarinen nousukorkeus h on vakio riippumatta vallitsevasta kosteuspuitoisuudesta ja se voidaan määrittää suoraan kaavasta (3.4).

Todellisissa materiaaleissa kapillaariputkien säde ja eri putkien kytkeytyminen toisiinsa vaihtelee huomattavasti. Avoimessa rakenteessa, jossa kaikki huokokset ovat vapaasti kosketuksissa vesilähteen eli vapaan veden pinnan kanssa kaikki tietyn säteen omaavat ja sitä pienemmät kapillaariputket ovat täynnä nestettä tietylle putken säteestä riippuvalla korkeudelle saakka. Kapillaariseen kastumiskäyrään (kapillaarinen absorptio) liittyy kuitenkin voimakas hystereesi ilmiö. Tämä johtuu monimutkaisen kapillaariverkoston kytkeytymisestä toisiinsa ja kapillaarihuokoskäytävien säteen muutoksista. Alunperin kuivassa näytteessä ei ole yhtenäistä vesikalvoa huokosverkoston seinämien pinnalla, mikä estää kosteuden kulkeutumisen mikrohuokosiin, jotka muutoin olisivat täyttyneet. Kosteuspotentiaa ei pyrkii tasaantumaan huokosverkoston sisällä, jolloin huokosiin voi jäädä ilmaa. Ilman liukeneminen veteen on sitä hitaampaa mitä suurempi ilmarakkula huokoseen on jäänyt. Lisäksi kapillaarinen nousukorkeus on suoraan verrannollinen kostumiskulman kosiniin ($\cos\theta$), johon voi liittyä voimakas hystereesi ilmiö.

Kapillaarinen kuivumiskäyrä (kapillaarinen desorptio) toteutuu, mikäli alunperin vedellä kyllästyneen materiaalin tai rakenteen annetaan kuivua siten, että sen huokosverkoston alapää on kosketuksissa vesilähteeseen. Yksittäisen kyllästyneen kapillaariputken tapauksessa veden pinta laskee tasolle, joka vastaa huokosalipaineen (p_c) ja hydrostaattisen paineen tasapainotilaa. Huokoisessa materiaalissa kapillaarisen kuivumisen yhteydessä ohuisiin huokostiehyisiin pintajännityksen ja muodostuvan huokosalipaineen vaikutuksesta jää nestettä. Huokokset, jotka pidättävät tätä ns. jäännös- eli residuaalikosteutta eivät osallistu nesteen kuljettamiseen. Kapillaarivoimien lisäksi myös muut voimat pidättävät vettä yhtenäisten vallien ja seinämien läheisyydessä, kuten osmoosi ja adsorptio. Kapillaaristen voimien ja adsorption välillä on oleellinen ero. Adsorptio tapahtuu kaasun ja kiinteän aineen välillä, kun taas kapillaariset voimat liittyvät nesteeseen ja kiinteään aineeseen väliseen sidokseen. Maamekaniikassa kaikki nämä voimat käsitellään kuitenkin yleensä samana ilmiönä. Yhtenäisen vesivaipan katkettua huokosten seinämien kuivuessa mikrohuokosiin jäänyt jäännöskosteus voi poistua vain haihtumalla.

Kuvan 3.7 mukaisesti kapillaarisen absorption ja desorption käyrät poikkeavat selvästi toisistaan. Kapillaarista nousua säätelevät suuret huokokset, jolloin kosteuden nousua rajoittaa suurimman kapillaarihuokoksen huokoksen säde r , kun taas kuivumista säätelevät pienet mikrohuokokset ja niihin jäävä jäännöskosteus. Kostumis- ja kuivumiskäyrien eroon liittyen olisi syytä tutkia erilaisia välitiloja, joissa osittain kostea näyte jätetään kuivumaan tai kapillaarisen nousun annetaan tapahtua osittain kosteaan näytteeseen.

Maalajien kapillaarisella nousukorkeuden arvioimiseksi on esitetty joitakin likiarvokaavoja lähteissä /Kurnitski et al. 1998, Permeabilitet och kapillaritet 1972/. Hiekan ja soran ylempää kapillaarista nousukorkeutta voidaan arvioida huokoisuuden n ja tehokkaan raekoon d_{10} avulla kaavalla (3.7):

$$h_{ay} = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{n} - 1\right)}{d_{10}} \text{ tai kaavalla (3.8):} \quad (3.7)$$

$$h_{ay} = \frac{C}{e \cdot d_{10}}, \quad (3.8)$$

missä e on huokosluku ja C on kokeellinen rakeiden muodosta ja järjestymistavasta riippuva kerroin, jonka arvo vaihtelee 1 ...5.

Kostumisessa esiintyvää alemmaa kapillaarista nousukorkeutta voidaan arvioida kaavalla (3.9):

$$h_{aa} = h_c \frac{d_{10}}{d_{60}}, \quad (3.9)$$

Lähteessä /Permeabilitet och kapillaritet 1972/ on annettu eri maalajeille ohjeellisia alemman kapillaarisen nousukorkeuden arvoja kostumisessa (taulukko 3.2).

Taulukko 3.2 Maalajien kapillaarinen nousukorkeus.

Maalaji	Kapillaarinen nousukorkeus (m)	
	Löyhä	Tiivis
Karkea hiekka	0,03 ... 0,12	0,04 ... 0,15
Hiekka	0,10 ... 0,35	0,12 ... 0,50
Hieno hiekka	0,3 ... 2,0	0,4 .. 3,5
Karkea siltti	1,5 ... 5	2,5 ... 8
Hieno siltti	4 ... 10	6 ... 12
Savi	> 8	> 10

3.1.4 Osmoottinen sitoutuminen

Osmoottinen sidos johtuu diffuusiosta puoliläpäisevän kalvon läpi ja tästä syntyvästä ns. osmoottisesta paineesta. Tämä kosteuden sitoutumismuoto esiintyy yleisesti eloperäisissä aineissa, joiden solukalvo on puoliläpäisevä ja aineissa on vesiliukoisia komponentteja.

3.1.5 Sitoutumaton vesihöyry

Materiaalihuokosissa voi olla myös vapaata, sitoutumatonta vesihöyryä.

3.2 Kosteuden siirtymismuotoja eri faaseissa

Vesipitoisuuden muutosgradientti (δ) huokoisessa materiaalissa voidaan jakaa kahteen osaan: kapillaarisista voimista johtuvaan kosteuden lisääntymiseen (δ_{CAP}) ja haihtumis-, diffuusio ja kondensaatiokierrosta johtuvaan kosteuspitoisuuden kasvuun eli hygroskooppiseen kosteuden lisääntymiseen (δ_{EDC} , evaporation – diffusion – condensation).

$$\delta = \delta_{CAP} + \delta_{EDC} \quad (3.10)$$

Nämä kaksi kosteuspitoisuuden kasvugradienttejä johtuvat eri mekanismeista, joten ne voidaan määrittää erikseen niin numeerisessa mallinnuksessa kuin koetilanteessakin.

Kosteuden siirtymismuodot voidaan jakaa neljään päätyyppiin:

- veden painovoimainen siirtyminen
- kosteuskonvektio
- diffuusio (diffuusio ilmassa ja diffuusio huokosissa), siirtävänä voimana vesihöyrynpitoisuuksien ero
- kapillaarinen kosteuden siirtyminen, siirtävänä voimana kapillaarivoimien aiheuttama huokosalipaine-ero.

3.2.1 Veden painovoimainen siirtyminen

Vedenläpäisevyys kuvaa nesteen virtauksen taustalla tietyssä huokoisessa aineessa. Aineen raekoko ja huokoskoostumus sekä rakeiden ja huokosten muoto vaikuttavat vedenläpäisevyyteen. Lisäksi vedenläpäisevyyteen vaikuttavat nesteen ominaisuudet: ominaispaino ja dynaaminen viskositeetti. Veden painovoimaisesta siirtymisestä täysin vedellä kyllästetyssä maassa ja laminaarisen virtauksen alueella kuvaa Darcyn laki (3.11) /Permeabilitet och kapillaritet 1972/:

$$v = k \Delta H, \quad (3.11)$$

missä v on veden nopeus (m/s), k on vedenläpäisevyys (m/s) ja ΔH on hydraulinen gradientti (m/s),

Maalajien vedenläpäisevyysarvoja on esitetty taulukossa (Taulukko 3.3) /Permeabilitet och kapillaritet 1972/.

Taulukko 3.3 Vedenläpäisevyyden arvoja.

Maalaji	Vedenläpäisevyys k (m/s)
Sora	$10^{-1} \dots 10^{-3}$
Hiekka	$10^{-2} \dots 10^{-6}$
Siltti	$10^{-5} \dots 10^{-9}$
Savi	$< 10^{-9}$

Maalajin vedenläpäisevyyttä voidaan arvioida myös rakeisuuskäyrän d_{10} -arvon (se raekoko, jota pienempää raekoko on 10% koko materiaalista) ja huokosmuodun n avulla. Hiekalla ja soralla voidaan vedenläpäisevyys laskea kaavalla (3.12) /Fukt handbok 1994/:

$$k = C \cdot \left[\frac{100 \cdot d_{10} \cdot n}{1 - n} \right]^2, \quad (3.12)$$

missä C on Hazen vakio (1/ms), jonka arvo on keskimäärin 2.

3.2.2 Kosteuskonvektio

Konvektiossa vesihöyryä siirtyy ilmavirran mukana. Ilmavirtausten syntymiseen tarvitaan rakenteen eri puolille erilaiset ilman kokonaispainet. Ilmanpaine-eroja aiheuttavat mm. tuuli, lämpötilaerot ja ilmanvaihtojärjestelmän puhaltimet. Ilmavirran liikkuaessa lämpimästä kylmempään vesihöyry kondensoituu eli tiivistyy. Vastaavasti ilmavirran liikkuaessa kylmästä

lämpimämpään rakenne kuivuu. Kosteuden konvektiota voi tapahtua raoissa, rei'issä sekä huokoisessa materiaalissa. Reikien ja rakojen kautta tapahtuva kosteuden konvektio on merkityksellinen verrattuna huokoisissa materiaaleissa tapahtuvaan konvektioon /Björkholtz/. Konvektion kosteusvirta lasketaan kaavasta (3.13)/Fukthandbok, 1994/:

$$G = vR \quad (3.13)$$

missä G on kosteusvirta (kg/s), v kosteuspitoisuus kg/m^3 ja R ilmavirta m^3/s .

3.2.3 Diffuusio

Diffuusiosta vesimolekyylit siirtyvät korkeammasta konsentraatiosta alhaisempaan. Diffuusiosta potentiaalina on siis vesihöyrypitoisuuksien ero, joka voidaan ilmoittaa joko kosteuserona tai osapaine-erona. Diffuusion erikoistapauksia ovat effuusio ja termodiffuusio. Effuusio eli Knudsenin molekyyliliike on molekyyliden makroskooppista virtausta, joka syntyy kun molekyylit törmäävät toisiinsa ja huokosten seinämiin. Termodiffuusio syntyy lämpötilagradientin aiheuttamana. Vesimolekyyliden liike suuntautuu lämpötilagradientin eli suurenevan lämpötilan suuntaan. Effuusiolla ja termodiffuusiolla ei ole merkitystä rakennusfysiikassa /Björkholtz/.

Mikäli huokokset eivät sisällä vettä ja niiden koko on suurempi kuin vesimolekyylin keskimääräinen vapaa matka, voidaan vesihöyryn massavirta pinta -alaa kohti laskea kaavasta (3.14) (Fick'n ensimmäisen lain sovellus) /Fukt handbok/:

$$g = -d_p \frac{dp}{dx} \quad (3.14)$$

Kaavassa 3.14 potentiaalina on osapaine -ero. Mikäli potentiaalina käytetään kosteuseroa, kaava tulee muotoon (3.15) /Björkholtz/:

$$g = -d_v \frac{dv}{dx} \quad (3.15)$$

Vesihöyryn läpäisevyysarvojen d_v ja d_p välillä vallitsee yhteys (3.16) /Björkholtz, Fukthandbok/:

$$\delta_v = 461,4 (273 + t) \delta_p \quad (3.16)$$

Stationääritilassa (kosteusvirta ei ole ajasta riippuva) kosteusvirta g voidaan laskea kaavasta (3.17) /Fukthandbok/:

$$g = d_v \frac{v_2 - v_1}{L} = \frac{v_2 - v_1}{L/d_v} \quad (3.17)$$

jossa v_2 ja v_1 ovat kosteuspitoisuudet rakenteen eri puolilla.

Termiä $L/d_v = Z_v$ nimitetään vesihöyrynvastukseksi.

Epästationääritilassa (kosteusvirta on ajasta riippuva) kosteusvirta saadaan kaavasta (3.18) /Fukthandbok/:

$$g = -D_w \frac{dw}{dx} \quad (3.18)$$

missä D_w on kosteusdiffusiteetti, joka voidaan laskea kaavasta (3.19) tai (3.20) /Fukthanbok/:

$$D_w = d_v \frac{dv}{dw} \quad (3.19)$$

$$D_w = \frac{d_v v_s(T)}{\mathbf{x}}, \quad (3.20)$$

jossa \mathbf{x} on kosteuskapasiteetti, (dw/dx)

Epästationääritilan kosteusvirran kaava ratkaistaan yleensä käyttäen numeerisia menetelmiä.

Lähteen /Hillel 1972/ mukaan yleisesti oletetaan, että maassa kosteuden liike nesteinä on vallitseva ja siksi vesihöyryn diffuusion vaikutukset maassa jätetään usein huomioonottamatta.

3.2.4 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Kapillaarihuokosputkessa (säde r), veden laminaarivirtaus voidaan määrittellä Poiseuillen lain mukaan (3.21) /Janz, 1997/:

$$g = \frac{r^2 \rho}{8\eta} \frac{dP}{dx}, \quad (3.21)$$

missä η on viskositeetti (Pa s) ja ρ on tiheys. Vaakasuuntaisessa putkessa potentiaalina oleva paine on (3.22) /Janz, 1997/:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{P_{cap}}{x} \quad (3.22)$$

missä P_{cap} kapillaaripaine, joka voidaan laskea kaavalla 3.2 ja x on meniskin tunkeutuma matka putkessa. Meniskin etenemänopeudeksi v ($v=dx/dt$) putkessa saadaan (3.23) (Janz, 1997/:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{r g \cos \theta}{4\eta x} \quad (3.23)$$

josta integroimalla saadaan aika t , jossa meniski (vesipatsas) on edennyt putkessa matkan x /Janz, 1997/:

$$t = \frac{2h}{r g \cos q} x^2 \quad (3.24)$$

Edellä esitetyt kaavat pätevät r-säteisille huokosputkille. Kapillaarista siirtymistä voidaan myös kuvata Darcyn lailla, jossa potentiaalina on huokosalipaine, p_c . Darcyn lain mukaan kosteuden siirtyessä nesteenä kosteusvirta on (3.25) /Fukthandbok/:

$$g = \frac{k dp_c}{h dx} \quad [\text{kg/m}^2 \text{ s}], \quad (3.25)$$

missä η on viskositeetti ja k on permeabiliteetti (kg/m). Huokosalipaine p_c on kapillaaripaineen p_{cap} vastaluku ($P_c = -P_{\text{cap}}$).

Permeabiliteetti riippuu huokosalipaineesta p_c , joka toisaalta riippuu kosteuspitoisuudesta w . Siten kaava voidaan kirjoittaa sellaisessa muodossa, jossa potentiaalina onkin kosteuspitoisuus ja kaava saa saman muodon kuin diffuusiotapauksessa kaava (3.18).

Kapillaarivoimat siirtävät vettä siis sekä pystysuunnassa että vaakasuunnassa. Kapillaarista kosteuden siirtymistä erilaisissa maalajeissa vaakasuunnassa ei ole paljoakaan tutkittu. Näyttöä rakennuksen täyttösorassa tapahtuvasta vaakasuuntaisesta kapillaarisesta kosteuden siirtymisestä esitetty lähteessä /Harderup, 1991/. Harderup on tutkinut rakennuksen kuivatusjärjestelmän toimivuutta asettamalla mittausputkia rakennuksen ympärille ja keskelle. Rankkasateen jälkeen n. 2 päivän kuluttua rakennuksen keskellä olevan mittausputken vedenpinta oli noussut ja vasta n. 1 kuukauden kuluttua vedenpinta oli palautunut 'normaalille' tasolle.

Kapillaarisen kosteuden siirtymistä voidaan arvioida olettamalla kostuva alue täysin kyllästyneeksi liikkuvaksi rajapinnaksi, jolloin märän rintaman etenemänopeus aineessa on

$$x = B \cdot \sqrt{t} \quad (3.26)$$

missä x [m] on rintaman tunkeutumissyvyys ja B [m/ \sqrt{s}] kokeellisesti määritetty tunkeutumiskerroin. Kertoimen B arvo riippuu faasirajan meniskin muodosta, pintajännityksestä, kosketuskulmasta ja nesteen viskositeetista. Faasirajan muodon ollessa riippuvainen vesipitoisuudesta, tunkeutumiskerroin on myös materiaalin vesipitoisuuden funktio.

Olettamalla kapillaarinen nousu täysin kyllästyneen rintaman eteenmäksi maamassassa, absorboituneen veden kokonaismäärä W [kg/m²] voidaan antaa kaavalla:

$$W = A \cdot \sqrt{t} \quad (3.27)$$

missä imeytymiskerroin A [kg/(m² \sqrt{s})] on myös kokeellisesti määritettävä kerroin.

3.2.5 Yhtäaikainen diffuusio ja kapillaarinen liike

Yhtäaikainen diffuusio ja kapillaarinen liike voidaan laskea periaatteessa yhdistämällä kosteusvirtojen yhtälöt. Tarkasteluissa ne voidaan kuitenkin jakaa kahteen osaan. Alueella, jossa kosteus on kriittistä kosteutta alempi otetaan huomioon vain diffuusio ja vastaavasti

alueella, jossa kosteus on kriittistä kosteutta suurempi otetaan huomioon vain kapillaarinen liike.

3.3 Maamateriaalin ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus

Maan mineraaleilla on lähes kaikilla sama tiheys $\rho \approx 2650 \text{ kg/m}^3$ ja ominaislämpökapasiteetti $C_p \approx 755 \text{ J/kg K}$. Veden tiheys on alle puolet mineraalien tiheydestä $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, mutta sen ominaislämpökapasiteetti on yli kaksinkertainen mineraaleihin verrattuna. Koska ilman tiheys on vain noin 1/1000 -osa veden tiheydestä, se jätetään huomioimatta maan ominaislämpöä määritettäessä. Maamateriaalin ominaislämpökapasiteetti on maan eri osatekijöiden tilavuusosilla painotettu summa:

$$C = f_s \cdot C_s + f_w \cdot C_w \quad (3.28)$$

missä

C	= maamateriaalin ominaislämpökapasiteetti
f_s	= maan mineraalien tilavuusosakerroin
C_s	= maan mineraalien ominaislämpökapasiteetti
f_w	= maassa olevan veden tilavuusosakerroin
C_w	= veden ominaislämpökapasiteetti.

Luonnontilaisessa maassa kiinteä aine muodostuu mineraalien lisäksi orgaanisesta materiaalista, jolloin kaava (3.28) voidaan esittää muodossa (3.29)

$$C = f_m \cdot C_m + f_o \cdot C_o + f_w \cdot C_w \quad (3.29)$$

missä f_o on orgaanisen materiaalin tilavuusosakerroin ja C_o vastaava ominaislämpökapasiteetti. Taulukossa 3.6 on esitetty maan tyypillisempien mineraalien, veden ja ilman lämpöparametrien arvoja lämpötilassa $T = 300 \text{ K}$.

Taulukko 3.4 Maan tyypillisempien mineraalien, veden ja ilman lämpöparametrien arvoja lämpötilassa $T = 300 \text{ K}$.

Aine	Tiheys	Ominaislämpökapasiteetti	Lämmönjohtavuus	Terminen diffuusiokerroin
	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$C_p \text{ [J / kg} \cdot \text{K]}$	$k \text{ [W / m} \cdot \text{K]}$	$\alpha \times 10^{-6} \text{ [m}^2 \text{ / s]}$
Graniitti	2630	775	2.79	1.37×10^{-6}
Kvartsiitti	2640	1105	5.38	1.80×10^{-6}
Kvartsi	2660	755	8.8	4.38×10^{-6}
Orgaaninen aines	~1300	~ 1923	0.25	0.10×10^{-6}
Vesi	1000	4200	0.598	0.15×10^{-6}
Jää	920	2065	2.2	1.16×10^{-6}
Ilma	1.16	1000	0.025	22.6×10^{-6}

Tilavuusosakerrointen summa kaavassa (3.29) on

$$f_m + f_w = 1 - f_a \quad (3.30)$$

missä f_a = ilman tilavuusosa maan huokosissa. Materiaalin huokosten kokonaistilavuus on nyt

$$f = f_a + f_w \quad (3.31)$$

Tyypillisissä mineraalimaalajeissa kiinteän aineen tilavuusosakerroin vaihtelee välillä 0.45 ... 0.65 ja maamassan kokonaisominaislämpökapasiteetti kuivan maan arvosta $C = 1 \text{ MJ} / \text{m}^3 \text{ K}$ täysin kyllästyneen maan arvoon $C = 3 \text{ MJ} / \text{m}^3 \text{ K}$.

Maan lämmönjohtavuus I , toisin kuin sen ominaislämpökapasiteetti, riippuu voimakkaasti maan huokosissa olevan ilmamäärästä. Ilma on veteen ja etenkin mineraalirakeisiin nähden lämmöneriste, joten korkea ilman tilavuusosakerroin pienentää merkittävästi maan lämmönjohtavuutta. Maan ominaislämpökapasiteetti voi muuttua huokosissa olevan vesimäärän kasvaessa kolmin- tai nelinkertaiseksi, mutta samalla maan lämmönjohtavuus voi kasvaa yli satakertaiseksi. Maan lämmönjohtavuus on myös riippuvainen kiinteän ainesosan rakeiden koosta, muodosta ja jakautumisesta maamassassa.

Kun kyseessä on täysin kyllästynyt tai täysin kuiva maakerros, maamassan lämmönjohtavuus voidaan ilmoittaa kaavalla (3.32):

$$k = \frac{f_o \cdot I_o + k \cdot f_i \cdot I_i}{f_o + k \cdot f_i} \quad (3.32)$$

missä f_o ja I_o ovat veteen tai ilmaan liittyvät tilavuusosa- ja lämmönjohtavuuskertoimet, I_i ja f_i mineraalirakeisiin liittyvät vastaavat kertoimet ja k partikkeleiden keskimääräisen lämpötilagradientin suhde ympäröivän massan, eli veden tai maan lämpötilagradienttiin:

$$k = \frac{(dT/dz)_i}{(dT/dz)_o} \quad (3.33)$$

k :n arvo ei riipu pelkästään lämmönjohtavuuksien I_s/I_o suhteesta, vaan myös kiinteiden partikkelien koosta, muodosta ja järjestäytymisestä.

Maan ominaislämmönjohtavuutta on arvioitu kaavan (3.34) avulla tapauksissa, joissa maassa on edustettuna kaikki kolme osatekijää: mineraalirakeet, vesi ja ilma /Bavel & Hillel, 1975, 1976/. Maa voidaan nyt otaksua kontinuumiksi vesimassaksi, johon ilma ja kiinteät partikkelit ovat sekoittuneet.

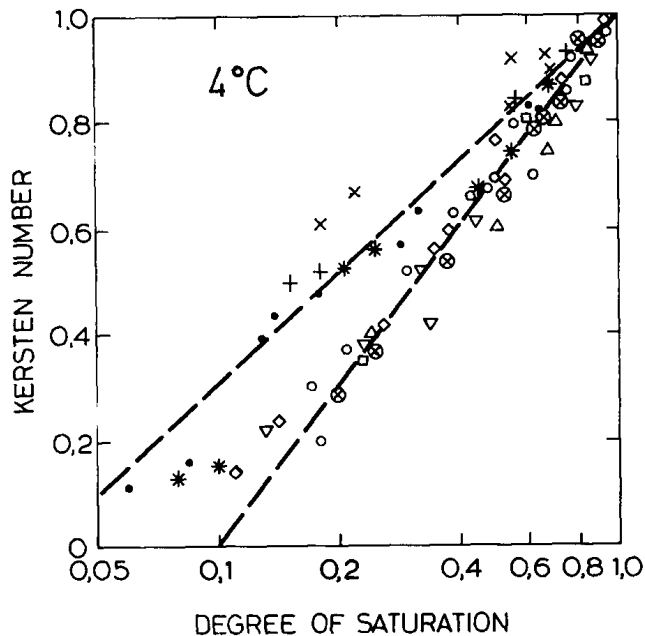
$$k = \frac{f_w \cdot I_w + k_s \cdot f_s \cdot I_s + k_a \cdot f_a \cdot I_a}{f_w + k_s \cdot f_s + k_a \cdot f_a} \quad (3.34)$$

missä λ_w , λ_a ja λ_s ovat veden, ilman ja kiinteiden partikkelien lämmönjohtavuudet ja κ_s maan kiinteän aineen tilavuusosan lämpötilagradientin suhde veden lämpötilagradienttiin ja vastaavasti κ_a ilman lämpötilagradientin suhde veden lämpötilagradienttiin.

Kostean maan lämmönjohtavuutta voidaan arvioida myös täysin kyllästyneen ja täysin kuivan maan lämmönjohtavuuksien ääriarvojen avulla /Johansen, 1973/. Tässä menetelmässä ääriarvojen välillä vaihteleva lämmönjohtavuus voidaan arvioida maan kyllästysasteen perusteella Kerstenin luvun avulla:

$$Ke = (I - I^0)/(I^1 - I^0) \quad (3.35)$$

Empiirinen korrelaatio Kerstenin luvun ja kyllästysasteen välillä on määritetty laajoilla M. S. Kerstenin julkaisemilla koesarjoilla /Kersten 1949/. Kokeiden perusteella maan raakoostumuksella on suuri merkitys sulan maamassan lämmönjohtavuuteen. Karkea - ja hienorakeisen maan Kerstenin luvun muutokset kyllästysasteen muuttuessa on esitetty kuvassa 3.8.



Kuva 3.8 Kerstenin 1949 määrittämien sulan maan lämmönjohtavuuksien riippuvuus maan hienoainespitoisuudesta: a: karkearakeinen maa ($5\% < 0,06 \text{ mm}$), b: hienorakeinen maa ($40\% < 0,06 \text{ mm}$)

Jäätäneessä maassa eroa karkea - ja hienorakeisen maan välillä ei ole. Jäätäneessä tilassa Kerstenin luvun ja maan kyllästysasteen välillä onkin lineaarinen relaatio:

$$Ke = S_r \quad (3.36)$$

Mineraalirakeiden lämmönjohtavuus maamassassa voidaan graniittiperäisissä maalajeissa määrittää yksinkertaisella kaavalla:

$$I_2 = 2^{(1-q)} \cdot 7,7^q, \quad (3.37)$$

kun tiedetään mineraalirakeiden kvartsipitoisuus q . Kvartsin lämmönjohtavuus on selvästi korkeampi $\lambda = 7.7 \dots 10 \text{ W/mK}$ kuin graniitin muiden yleisten mineraalien maasälvän ja kiilteiden $\lambda \approx 2 \text{ W/mK}$ ja edellä mainittu kokonaislämmönjohtavuuden arvo onkin saatu suoraan näiden mineraalien tilavuusosien avulla. Kvartsin lämmönjohtavuutena on käytetty alalikiarvoa $\lambda = 7.7 \text{ W/mK}$.

Vedellä tai jäällä kyllästyneen maan lämmönjohtavuudelle voidaan nyt laskea likimääräisarvo mineraalien ja veden tai jään tunnettujen lämmönjohtavuuksien avulla, kun materiaalien tilavuusosat n tunnetaan:

$$I^1 = I_1^n \cdot I_2^{(1-n)} \quad (3.38)$$

missä

- λ^1 = kyllästyneen maan lämmönjohtavuus [W/mK]
- λ_1 = veden tai jään lämmönjohtavuus [W/mK]
- λ_2 = mineraalien lämmönjohtavuus [W/mK, kaava 3.33]

Kerstenin luvun, maan kyllästysasteen sekä kuivan ja kyllästyneen tilan lämmönjohtavuuksien ääriarvojen avulla maan lämmönjohtavuutta voidaan arvioida kaavalla (3.39):

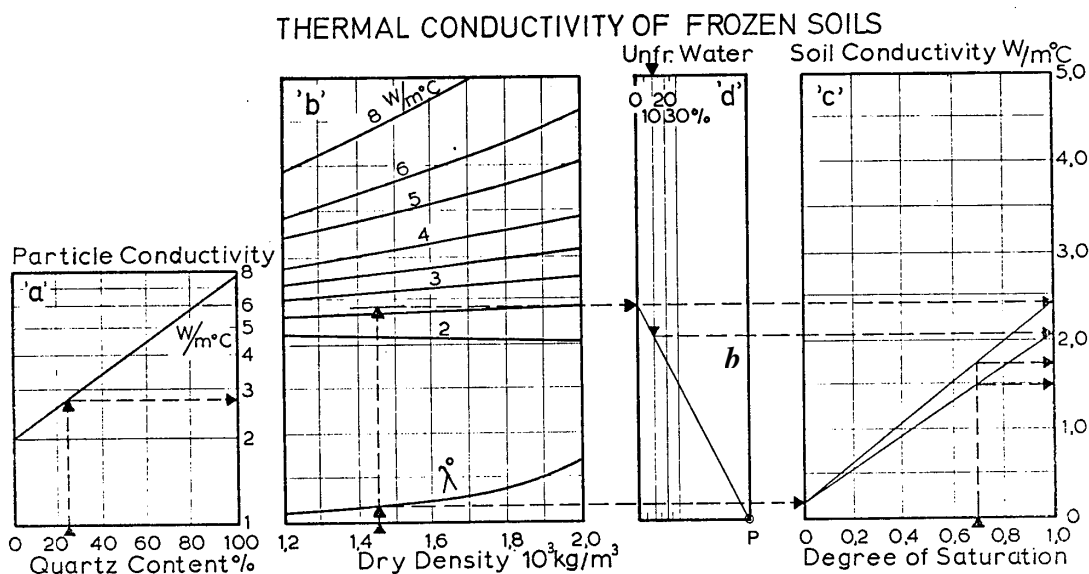
$$I = I^0 + (I^1 - I^0) \cdot Ke(S_r) \quad (3.39)$$

Kuivan maan $S_r = 0 \%$ lämmönjohtavuutta voidaan karkeasti arvioida kaavalla (3.40) /Johansen 1973/:

$$I = 0.05 \cdot n^{-1.75} \pm 20\% \quad (3.40)$$

Jäätynneen maan lämmönjohtavuus voidaan määrittää Johansenin /Johanssen, 1973/ esittämän diagrammiston avulla kuvan 3.11 mukaisesti. Tarvittavat muuttujat ovat mineraalirakeiden kvartsipitoisuus q , maan kuivatiheys γ_d , raemuoto, jäätymättömän veden määrä W_u tilavuusprosentteina veden kokonaisuudesta sekä maan kyllästysaste S_r .

Sulan maan lämmönjohtavuus voidaan määrittää Johansenin 1973 esittämän diagrammiston avulla kuvan 3.9 mukaisesti. Tarvittavat lähtöparametrit ovat mineraalirakeiden kvartsipitoisuus q , maan kuivatiheys γ_d sekä hienoaineksen osuus raekoostumuksesta.



Kuva 3.9 Jäätäneen maan lämmönjohtavuuden määrittäminen. Diagrammi on määritetty materiaaleille lämpötilassa $T = -4^{\circ}C$, mutta sitä voidaan käyttää lämpötilaan $T = -20^{\circ}C$ asti./Johanssen 1973/.

Esimerkin lähtöarvot:

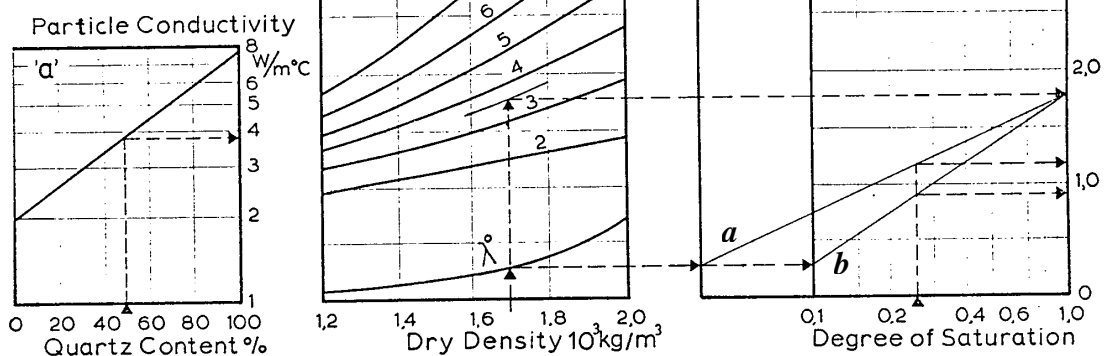
$$q = 50 \%$$

$$g_d = 1700 \text{ kg/m}^3$$

$$S_r = 0.25$$

$$a: 5\% < 0.06 \text{ mm}$$

$$b: 40\% < 0.06 \text{ mm}$$



Kuva 3.10 Sulan maan lämmönjohtavuuden määrittäminen. Diagrammi on määritetty lämpötilassa $T = +4^{\circ}C$ mutta sitä voidaan käyttää lämpötilaan $T = +20^{\circ}C$ asti./Johansen 1973/.

Johansenin 1973 mukaan laskettuja lämmönjohtavuuksien arvoja on verrattu Kerstenin 1949 tekemiin kokeisiin kuvissa 3.11 a) ja b) kyllästyneen sulan ja jäätäneen maan osalta.

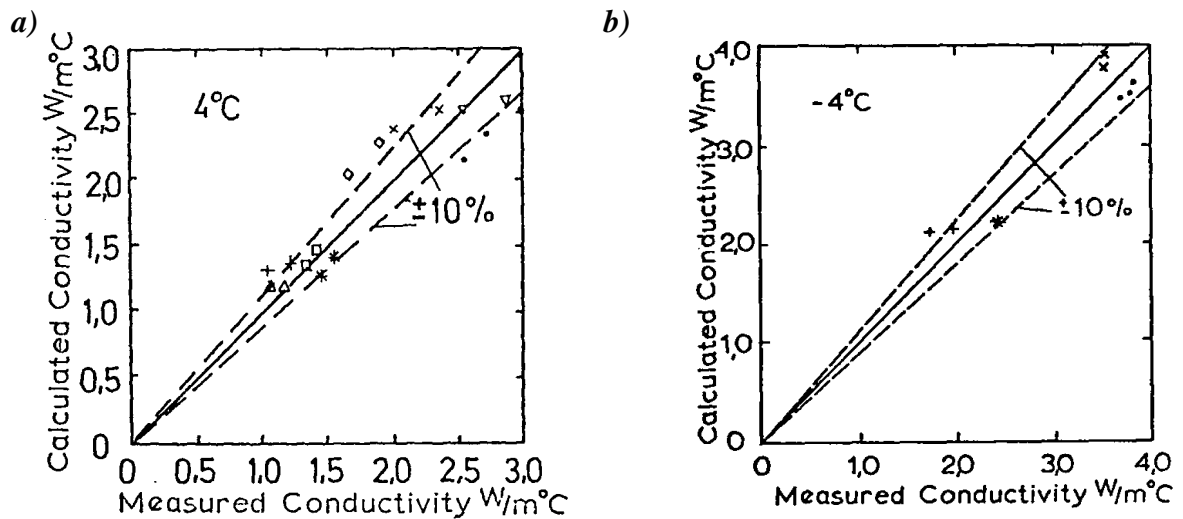
Laskennallisten arvojen tarkkuus verrattuna koetuloksiin on $\pm 10 \%$. Kuivan maan

lämmönjohtavuuksia suhteessa materiaalin huokoisuuteen on esitetty kuvassa 3.12 /Johansen 1973/.

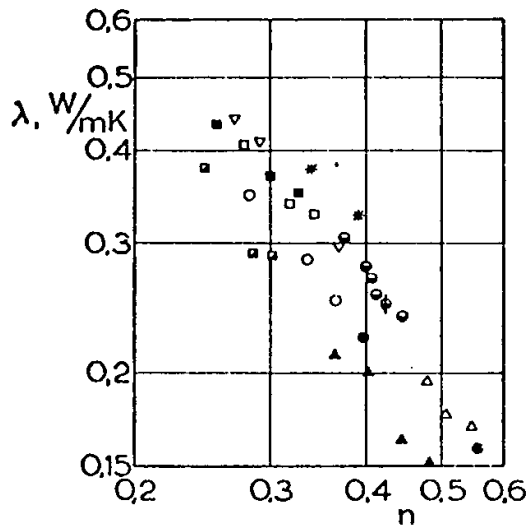
Terminen diffuusiokerroin α [m²/s] on massan lämmönjohtavuudesta ja lämpökapasiteetista riippuva kerroin, joka määrittää aineen lämmönjohtokyvyn suhteessa sen kykyyn varastoida energiaa (3.41):

$$a = \frac{l}{r \cdot c_p} \tag{3.41}$$

Suuren termisen diffuusiokertoimen omaavat materiaalit reagoivat nopeasti lämpötilanmuutoksiin ympäristössään. Mitä pienempi terminen diffuusiokerroin materiaalilla on, sitä kauemmin kestää tasapainotilan saavuttaminen lämpötilamuutoksien yhteydessä.



Kuva 3.11 Kerstenin 1949 koetulosten vertailu laskettuihin lämmönjohtavuuksien arvoihin a) kyllästyneessä sulassa maassa, b) kyllästyneessä jäätyneessä maassa.



Kuva 3.12 Kuivien maidon ja murskeiden lämmönjohtavuus huokoisuuden n funktiona.

3.4 Yhteenveto

Kosteuden sitoutuminen maamassaan tapahtuu pääasiallisesti adsorptiolla ja kapillaarisesti. Näiden sitoutumismuotojen välillä on oleellinen ero. Adsorptio tapahtuu kaasun ja kiinteän aineen välillä kun taas kapillaariset voimat liittyvät nesteeseen ja kiinteän aineen väliseen sidokseen. Maamekaniikassa kaikki nämä voimat käsitellään yleensä samana ilmiönä. Yhtenäisen vesivaipan katkettua huokosten seinämien kuivuessa mikrohuokosiin jäänyt jäännöskosteus voi poistua vain haihtumalla.

Adsorptioon vaikuttavat raerungon rakeisuus ja ominaispinta -ala, materiaalin epäpuhtaudet, kuten ruoste ja suolat, sekä mineraalikoostumus, jonka vaikutus suomalaisessa maaperässä on lähes merkityksetön. Tietyn materiaalin hygroskooppiseen tasapainokosteuteen vaikuttavat lämpötila ja suhteellinen kosteus.

Kapillaarisuuteen raekoon lisäksi vaikuttavat myös maalajien kerrostuminen, tiiviysaste ja lämpötila. Kapillaariseen tasapainokosteuteen vaikuttavat raerungon huokosten pinta -alat ja niiden muodostamien kapillaarihuokosten verkoston rakenne.

Savisilla maalajeilla sekä materiaalin pinnalle sitoutuneella vedellä että kapillaarisen meniskin muodostamalla vedellä on suuri merkitys vesipitoisuuden muodostumisessa. Vastaavasti hiekkaisilla maalajeilla adsorptio on lähes merkityksetön ja kapillaarinen sitoutuminen merkittävää.

Yhtäaikainen diffuusio ja kapillaarinen liike voidaan laskea periaatteessa yhdistämällä kosteusvirtojen yhtälöt. Samoin ne voidaan määrittellä erikseen kokeellisesti.

Maamassan lämmönjohtavuuteen vaikuttaa raerungon mineraalirakeiden kvartsipitoisuus, tiheys ja kyllästysaste.

4 Alapohjarakenteiden rakentamista Suomessa säätelevät määräykset ja ohjeet

4.1 Rakennusmääräyskokoelman osa C2 (Kosteus. Määräykset ja ohjeet 1998.)

Rakennusmääräyskokoelman osan C2 yleiseen rakennuksen kosteustekniseen toimintaan liittyy määräys: ”Rakenteet ja LVI -järjestelmät on tehtävä siten, ettei sisäisistä ja ulkoisista kosteuslähteistä peräisin oleva vesihöyry, vesi tai lumi haitallisesti tunkeudu rakenteisiin ja rakennuksen sisätiloihin. Tarvittaessa rakenteen on kyettävä kuivumaan haittaa aiheuttamatta tai rakenteen kuivattamiseen esitetään suunnitelmissa menetelmä.”

Rakennuspohjan salaojitukselta annetaan seuraava määräys: ”Rakennuspohja on salaojitettava veden kapillaarivirtauksen katkaisemiseksi ja pohjavedenpinnan pitämiseksi riittävällä etäisyydellä lattiasta tai ryömintätilan maanpinnasta sekä maahan imeytyvien pintavesien johtamiseksi pois perustusten vierestä ja rakennuksen alustalta. Rakennuksen sadevesijärjestelmään ei saa johtaa pintavesiä tai katoilta valuvia vesiä. Rakennuspohja voidaan jättää salaojittamatta, mikäli erikseen selvitettyä perusmaan vedenläpäisykykyä todetaan riittävän hyväksi eikä korkein pohjaveden korkeus ole haitallinen.” Lisäksi annetaan ohjeita salaojituserroksena käytettävästä materiaalista. Salaojituserros voidaan tehdä vettä hyvin läpäisevästä tasarakeisesta seulotusta luonnonkiviaineksesta, sepelistä, pestystä singelistä tai muusta materiaalista, jolla on vastaavat vedenläpäisevyysominaisuudet ja joka kestää asennus- ja käyttöolojen rasitukset.

Rakennuksen maanvastaisesta alapohjasta C2 määrää, että ”Kellarin lattiaa lukuun ottamatta on maanvastaisen lattian yläpinnan oltava vähintään 0,3 m rakennuksen ulkopuolella olevan maanpinnan yläpuolella. Tästä voidaan poiketa erityisestä syystä vähäisessä määrin. Tällöin on perustusten kuivatuksen ohella huolehdittava perusmuurin suojaamisesta ulkopuoliselta kosteudelta.” Maanvastaisen alapohjan rakenteista annetaan seuraavia ohjeita:

- Alapohjan lämmöneristys sijoitetaan kokonaan tai pääosin pohjalaatan alle. Lattian puurakenteet erotetaan bitumikaistalla tai vastaavalla materiaalilla alapuolisen laatan ja sokkelin rakenteista.
- Höyrinsulun tarve suunnitellaan tapauskohtaisesti ottaen huomioon betonilaatan kuivumismahdollisuus. Lahoavia materiaaleja ei saa jättää höyrinsulun alapuolelle.
- Maapohjalle tulevan lattiarakenteen alle levitetään vähintään 0,2 m paksu kosteuden kapillaarisen nousun katkaiseva kerros kuten sepele- tai pesty singelikerros. Kerroksen alle levitetään tarvittaessa suodatinkerros, mikäli perusmaa on savea tai silttiä.

Rakennuksen ryömintätalaisista alapohjista C2 vastaavasti määrää, että ”Alapohjan ryömintätila on suunniteltava ja rakennettava siten, ettei ryömintätilaan kerääny vettä ja että ryömintätila tuulettuu riittävästi, eikä ilmatilan kosteudesta ole haittaa rakenteiden toiminnalle ja kestävyydelle.” Alapohjarakenteista annetaan mm. seuraavia ohjeita:

- Sade- ja valumavesien pääsy rakennuksen ulkopuolelta ryömintätilaan ja jääminen sinne estetään sadevesien poistojärjestelmällä, maanpinnan muotoilulla ja tarvittaessa rakennuspohjan salaojituksella.
- Kosteuden kapillaarinen nousu maaperästä ja haihtuminen ryömintätilaan estetään esim. kapillaarisen nousun katkaisevalla salaojituserroksella tai kosteudeneristyksellä.

4.2 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet RIL 107-2000

RIL:n julkaisemassa rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet /RIL 107-2000/ sisältävät veden- ja kosteudeneristyksen toiminnalliset, rakenteelliset ja työhön liittyvät suositukset sekä vedeneristystarvikkeilta edellytettävät ominaisuudet. Vuonna 2000 ilmestynyt RIL 107 korvaa vanhan ohjeen RIL 107 -1989 kahden vuoden siirtymäajalla. Uudet ohjeet sisältävät C2:n määräyksen ja sitä täydentävät suositukset.

Rakennuspohjan salaojituksesta on annettu seuraavia ohjeita/suosituksia:

”Salaojituskerrokset salaojaputkineen sijoitetaan rakennuksen ympärille ja tarvittaessa myös alle. Salaojaputkien korkeimman kohdan tulee olla vähintään 0,4 m viereisen tai yläpuolisen maanvaraisen lattian alapinnan alapuolella. Maanvastaisen lattiarakenteen alapinnalla tarkoitetaan salaojituskerroksen ja itse rakenteen rajakerrosta. Jos kuitenkin salaojituskerroksena on siihen tarkoitukseen soveltuva lämmöneristyskerros (esim. kevytsora), tarkoitetaan lattian alapinnalla lämmöneristyksen yläpintaa. Alapohjan alla salaojaputken tulee olla kapillaarisen nousun katkaisevan salaojituskerroksen alapuolella. Viereiseen seinäanturaan tai matalaan perustetun perusmuurin anturaan nähden salaojaputken yläpinnan on oltava joka kohdassa sen alapintaa alempana. Mikäli salaojaa ei voida asentaa seinäanturan tai perusmuurianturan alapuolelle, tehdään perustusrakenteisiin tarvittaessa vaakasuuntainen kapillaarikatko salaojaputken yläpuolelle”. ”Salaojitusputkea ympäröivän salaojituskerroksen paksuuden tulee olla putken alla ja sivuilla vähintään 0,1 m ja päällä vähintään 0,2 m.” ”Perusmuuria, sokkelipalkkia tai kellarin seinää vasten olevan pystysuuntaisen salaojituskerroksen paksuudeksi suositellaan vähintään 0,2 m. Salaojituskerros tulee erottaa perusmaasta asianmukaisella kankaalla. Pystysuuntainen salaojituskerros ei yleensä poista perusmuurin, sokkelipalkin ja kellarin seinän vedeneristystarvetta. Pystysuuntaisena salaojituksena voidaan käyttää myös synteettistä salaojaa. Synteettistä salaojaa valittaessa on tarkastettava, että tuotteen lujuus ja vedenjohtokapasiteetti vastaavat käyttötilan kuormitusolosuhteita.”

Maanvastaisista alapohjista annetaan seuraavia ohjeita/suosituksia:

- ”Vesihöyryn kulkeutumisen mahdollisuus maapohjasta ylöspäin on huomioitava lattian pintarakenteiden valinnassa pinta-alaltaan suurissa alapohjissa, joissa maapohjan lämpötila on lähellä maanvaraisen betonilaatan lämpötilaa ja rakennuksissa, joissa maanvaraisen laatan alla kulkee lämpöputkia. Maanvaraisissa lattioissa suositellaan käytettäväksi salaojituskerroksen ja betonilaatan välissä lämmöneristettä kauttaaltaan koko alapohjan alueella.”
- ”Milloin lattian yläpinta on erityisestä syystä viereiseen maanpintaan verrattuna alempana kuin 0,3 m maanpinnan yläpuolella, varmistetaan sokkelin vedeneristyksellä sekä tehokkaalla pintavesien poisjohtamisella ja salaojituksella, ettei sade- ja sulamisvesiä tunkeudu ja siirry lattia- ja seinärakenteisiin.”

Ryömintätilaisista alapohjista on annettu seuraavia ohjeita ja suosituksia:

- ”Pohjaveden nouseminen ryömintätilaan estetään salaojituksella. Putkisalaojat toimivat vain läpäisevässä maalajissa. Putkisalaojilla ei voida yleensä yksin alentaa ryömintätilan suhteellista kosteutta.”
- Maapohjasta tulevaa kosteustuottoa rajoitetaan kapillaarisen nousun estävällä salaojituskerroksella, jona voi toimia esim. vähintään 200 mm paksu sepeli - tai

sorakerros, muovikalvo tai solumuovieriste. Peittämätöntä maanpintaa ei ryö mintätilassa pääsääntöisesti saa esiintyä. Sepeli ja kevytsora suositellaan erotettavaksi perusmaasta suodatinkankaalla. Kun käytetään muovikalvoa, huolehditaan siitä, että muovin päälle mahdollisesti valuvalla vedellä tai tiivistyvällä kosteudella on pois tumismahdollisuus.”

- ”Maapohjan lämmöneristämällä voidaan nostaa ryömintätilan lämpötilaa ja samalla alentaa ryömintätilan suhteellista kosteutta.”

4.3 Pohjarakennusohjeet RIL 121-1988

Pohjarakennusohjeiden rakennuspohjan pysyvää kuivatusta käsittelevän osan mukaan rakennuspohja on pidettävä kuivana siten, ettei rakennuksen tiloihin keräydy vettä eikä alapohjarakenteisiin tai muihin vastaaviin rakenteisiin synny kosteusvaurioita.

- Rakennuspohja pidetään kuivana johtamalla vesi salaojiin yleisimmin salaojitus kerrosten välityksellä. Edullisissa olosuhteissa kuivatukseen riittävät pelkät salaojituskerrokset.

Rakennuspaikan salaojituksen suunnittelu ja rakentaminen esitetään tarkemmin ohjeissa RIL 126 – Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus.

4.4 Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus RIL 126-1979

Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus –ohjeissa käsitellään sekä rakennuspohjan kuivatustarvetta, että salaojituskerroksessa käytettävien materiaalien laatuvaatimuksia.

Kuivanapidossa voidaan valita joku seuraavista menettelytavoista tai niiden yhdistelmä:

- Ei mitään kuivatustoimenpiteitä
- Sorakerros maanvaraisen lattian alle katkaisemaan pohjaveden kapillaarinen nousu
- Salaojat niitä ympäröivine rakenteineen tarvittaessa pumppausta ja painejohtoa apuna käyttäen
- Vesien kokoaminen läpäisevien sora - tai sepelikerrosten avulla kaivoihin tai muihin vedenkeräyslaitteisiin
- Vedenpaineen eristys.

Erityisselvitysten perusteella annetaan mahdollisuus muidenkin kuivatustapojen käyttöön.

Ohjeen mukaan kaikki huonetilat, kosteudelle arat rakenteet, lämpöjohdot ym. on aina suojattava kosteuden haitallisilta vaikutuksilta. Kuivatustoimenpiteet eivät luonnollisesti yksin riitä kosteushaittojen torjumiseen, vaan tarvitaan lisäksi erilaisia rakenteellisia ym. toimenpiteitä, jotka kuuluvat arkkitehti-, rakenne- tai LVI-suunnittelijan tehtäviin. Tällaisia ovat esimerkiksi ulko- ja sisäilman kosteudesta ja tiivistymisestä tai sisäisistä kosteuslähteistä aiheutuvien kosteushaittojen torjuminen. Kuivatustoimenpitein voidaan vain maassa ja maan pinnalla liikkuvan veden kulkua säädellä ja kapillaarinousu katkaista. Rakennuspohjan kuivatuksen yleispiirteinen arviointi on esitetty taulukon 4.1 avulla.

Taulukon 4.1 viittaukset salaojitusmateriaaleihin tarkoittavat ohjealueiden 1 tai 2 sora.
Kuivatusjärjestelmän rakennekerroksia käsiteltäessä annetaan ohjeissa /RIL 126 –1979/
ohjealueiden sorille rakeisuuskäyräraja(kuva 4.1). Ohjeen mukaan maanvaraisten lattioiden
alle ja perusmuurin tai sokkelipalkin vierellä välittömään kosketukseen ja yhteyteen
salaojaputkiston kanssa tehdään salaojituskerros. Salaojituskerroksen tehtävänä on koota ja
johtaa vedet salaojaputkistoon. Jos maaperä on erittäin hyvin vettä läpäisevää, voidaan
salaojituskerros jättää pois.

Rakennuspohjan maalaji	Pohjavesi	Lattiarakenteet maanpinnan alapuolella				Lattiarakenteet maanpinnan yläpuolella			
		Salaajituskerros		Suodatin	Salaajitus	Salaajituskerros		Suodatin	
		Materiaali	Paksuus [mm]			Materiaali	Paksuus [mm]		
Huonosti vettä läpäisevät maalajit: savet, hienot siltit, silttimoreenit	Pohjavesi pysyvästi kuivatettavan tason alapuolella	2	200	Tarve rakennuksen sivuilla tarkistetaan	Tarvitaan	Tarvitaan	Tarvittaessa kanavien, perustusten tai ympäristön kuivattamiseksi	-	
	Pohjavesi kuivatettavan tason yläpuolella	1	200	Tarve rakennuksen alla ja sivuilla tarkistettava	Tarvitaan	Tarvitaan			
Kohtalaisesti vettä läpäisevät maalajit: karkeat siltit, hienot hiekat, hiekkamoreenit, soramoreenit, turve	Pohjavesi pysyvästi kuivatettavan tason alapuolella	2	200	Tarve rakennuksen sivuilla tarkistetaan	Tarvitaan	Tarvitaan	Tarvittaessa kanavien, perustusten tai ympäristön kuivattamiseksi	Mahdollisesti rakennuksen sivuilla	
	Pohjavesi kuivatettavan tason yläpuolella	1	200	Tarve rakennuksen alla ja sivuilla tarkistettava	Tarvitaan	Tarvitaan			
Hyvin vettä läpäisevät maalajit: hiekat, sorat	Pohjavesi pysyvästi kuivatettavan tason alapuolella	-		-	Ei tarvita	Ei tarvita	Ei tarvita	-	
	Pohjavesi kuivatettavan tason yläpuolella ≤ 0.5 m < 0.5 m	1		Tarve tarkistetaan	Tarvitaan	Tarvitaan			
Kallio		1	200	Ei tarvita	Tarvitaan	Tarvitaan	Ei tarvita	-	

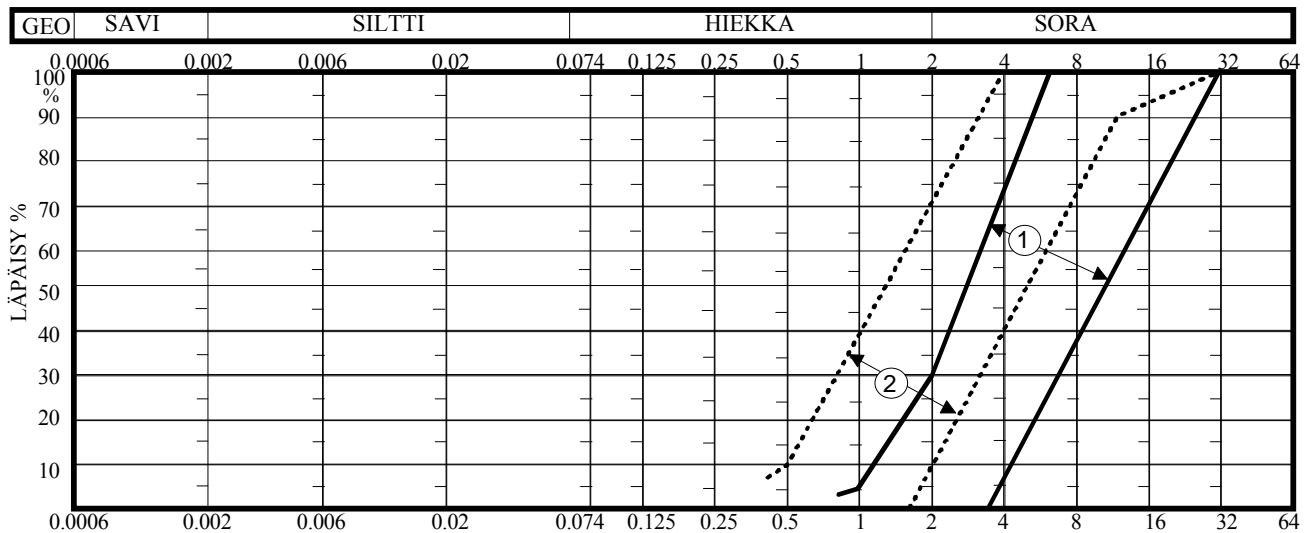
Taulukko 4.1 Kuivatustarpeen yleispiirteinen arviointi /RIL 126 -1979/

Salaojituskerroksen tehtävänä on myös katkaista kapillaarinen veden nousu. Salaojituskerroksen on siksi oltava paksumpi kuin materiaalin kapillaarinen nousukorkeus. Lisäksi on korkeutta varattava riittävästi veden virtaukselle salaojiin päin.

Maanvaraisen lattian alla tulee salaojituskerroksen paksuuden olla vähintään 200 mm. Pohjamaa salaojituskerroksen alla tasoitetaan ja tehdään salaojiin päin kaltevaksi pääpiirtein kaltevuuteen 1:100.

Salaojituskerrosta ei saa tiivistää yli 95 % tiiviyssasteeseen määritettynä parannetulla Proctor-kokeella. Tiiviyden pienentäminen 90 % parantaa virtausominaisuuksia yleensä n. 50 % ensin mainittuun tiiviyteen verrattuna. Jos kantavuussyistä vaaditaan yli 95 % tiiviyttä, tulee kerrospaksuutta lisätä tai käyttää salaojituskerroksena karkeampaa, paremman vedenläpäisevyyden omaavaa materiaalia.

Kuvassa 4.2 on esitetty ohjeen /RIL 126 -1979/ antamat ohjealueet salaojituskerroksen materiaalin rakeisuudelle. Ohjealueen 1 sora tulee käyttää silloin, kun salaojituskerroksen tehtävänä on johtaa siihen kertyvä vesi salaojiin sekä lisäksi katkaista kapillaarinen vedennousu, eli silloin, kun pohjavesi ainakin ajoittain saattaa nousta kerrokseen tai sivuilta voi virrata runsaasti vettä täyttökerroksiin. Ohjealueen 2 sora voidaan käyttää silloin, kun pohjavesi on selvästi kuivatustason alapuolella eikä suuria vesimääriä ole odotettavissa.



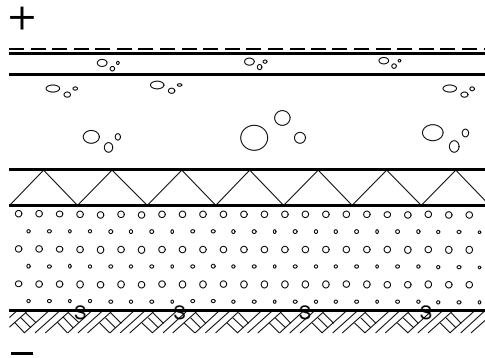
Kuva 4.1 Salaojituskerroksen rakeisuusalueet.

- 1 Käytettävän soran rakeisuuskäyrän tulee kulkea tällä alueella, jos pohjaveden pintaa lasketaan tai vettä saattaa runsaasti virrata sivuilta täyttökerroksiin. Alle 1 mm rakeita saa olla korkeintaan 5 %.
- 2 Normaalitapauksissa pohjaveden pinnan yläpuolella salaojituskerroksessa käytettävän materiaalin rakeisuusalue. 10 % läpäisy välillä 0.5 ... 2.0 mm, 90 % läpäisy välillä 3 ... 12 mm.

4.5 RT-kortiston mallit

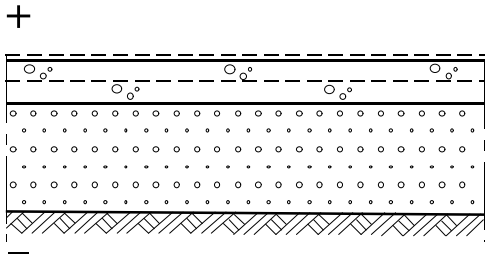
Rakennustietosäätiön ohjetiedosto /RT 83 -10444/ esittelee erilaisia yleisimpiä asuin-, toimisto-, liike- ja teollisuusrakennusten alapohjarakenteita. Kantavia alapohjarakenteita on 6:

Alapohja 1 - RT AP 201, asuinkerrostaloihin, toimisto-, liike-, ja julkisiin rakennuksiin sekä hallimaisiin teollisuusrakennuksiin:



- Pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan. Mikäli pintamateriaali on vesihöyryntiivis, on betonin rakennekosteuden oltava poistunut ennen pintamateriaalin asennusta. Enimmäiskosteuspitoisuudet pintamateriaalin valmistajan ohjeiden mukaan.
- Tasausbetoni
- Betonilaatta
- 70 mm lämmöneriste, solupolystyreeni ($\lambda_n=0,037$ W/mK)
- 200 mm koneellisesti tiivistetty salaojituskerros
- Suodatinkangas, käyttöluokka I
- Perusmaa savi, kallistus salaojiin 1:100

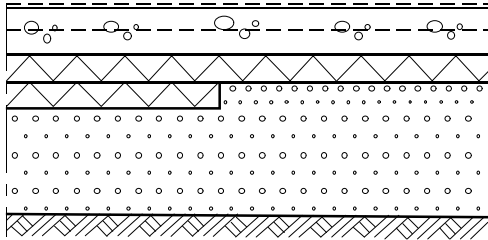
Alapohja 2 - RT AP 204, pien- ja rivitaloihin, asuinkerrostaloihin, toimisto-, liike- ja julkisiin rakennuksiin sekä hallimaisiin teollisuusrakennuksiin:



- Pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan
- 80 mm betonilaatta
- Sitkeä suojapaperi
- 200 mm koneellisesti tiivistetty salaojituskerros
- Perusmaa hiekka tai moreeni, kallistus salaojiin 1:100

Alapohja 3 - RT AP 205, pien- ja rivitaloihin, asuinkerrostaloihin, toimisto-, liike- ja julkisiin rakennuksiin sekä hallimaisiin teollisuusrakennuksiin:

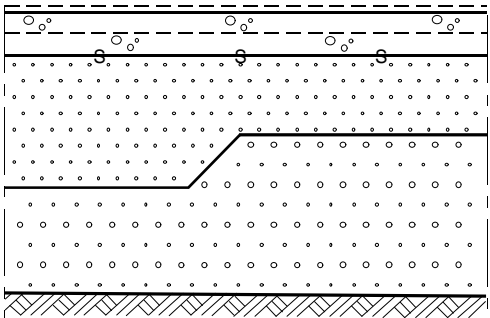
+



- Pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan. Mikäli pintamateriaali on vesihöyryntiivis, on betonin rakennekosteuden oltava poistunut ennen pinta materiaalin asennusta. Enimmäiskosteuspitoisuudet pintamateriaalin valmistajan ohjeiden mukaan.
- 80 mm betonilaatta
- Sitkeä suojapaperi
- 50 mm/uloimmalla reuna-alueella 100 mm lämmöneriste solupolystyreeni ($\lambda_n=0,041$ W/mK)
- 200 mm koneellisesti tiivistetty salaojituskerros
- Perusmaa hiekka tai moreeni, kallistus salaojiin 1:100

Alapohja 4 - RT AP 206, pien- ja rivitaloihin, asuinkerrostaloihin, toimisto-, liike- ja julkisiin rakennuksiin sekä hallimaisiin teollisuusrakennuksiin:

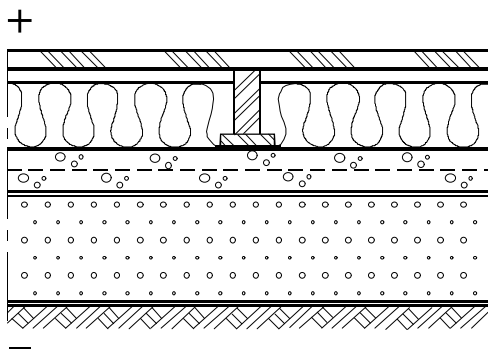
+



-

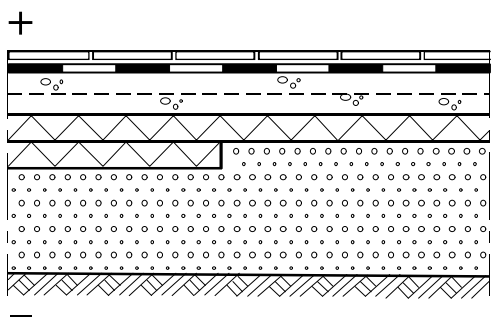
- Pintamateriaali ja -käsittely huoneselityksen mukaan. Mikäli pintamateriaali on vesihöyryntiivis, on betonin rakennekosteuden oltava poistunut ennen pintamateriaalin asennusta. Enimmäiskosteuspitoisuudet pintamateriaalin valmistajan ohjeiden mukaan.
- 80 mm betonilaatta
- Suodatinkangas, käyttöluokka I (voidaan korvata sitkeällä suojapaperilla)
- 150 mm /uloimmalla reuna-alueella 250 mm lämmöneriste kevytsoralajite ks-3 l
- 200 mm koneellisesti tiivistetty salaojituskerros
- Perusmaa hiekka tai moreeni, kallistus salaojiin 1:100

Alapohja 5 - RT AP 207, pien- ja rivitaloihin:



- Pintakäsittely huoneselityksen mukaan
- 33 mm lattialaudoitus
- 25 mm ilmarako
- 125 mm lämmöneriste mineraalivilla ($\lambda_n=0,045$ W/mK) + koolaus+ aluslaudat+ bitumikermikaista
- 80 mm betonilaatta
- Sitkeä suojapaperi
- 200 mm koneellisesti tiivistetty salaojituseros
- 0,2 mm muovikalvo
- Perusmaa hiekka tai moreeni, kallistus salaojiin 1:100

Alapohja 6 - RT AP 208, asuinkerrostaloihin, toimisto-, liike- ja julkisiin rakennuksiin sekä hallimaisiin teollisuusrakennuksiin:



- Laatoitus+ kiinnityslaasti+ tartuntasilta
- 1,5 mm vedeneriste muovimatto
- 80 mm betonilaatta
- Sitkeä suojapaperi
- 50 mm/uloimmalla reuna-alueella 100 mm lämmöneriste solupolystyreeni ($\lambda_n=0,037$ W/mK)
- 200 mm koneellisesti tiivistetty salaojituseros
- Perusmaa hiekka tai moreeni, kallistus salaojiin 1:100

Lisäksi RT-korteissa on esitetty 10 erilaista tuulettuvaa alapohjarakennetta.

4.6 Yhteenveto

Rakennusmääräyskokoelman osa C2 on uudistettu vastaamaan nykyistä käsitystä rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta vuonna 1998. Vastaavasti vuonna 2000 on uudistettu Veden ja kosteudeneristysohjeet, RIL -107, vastaamaan C2:n määräyksiä. Pohjarakennusohjeet, RIL-121 ja Rakennusten ja tonttialueiden kuivat usohjeet, RIL -126, ovat näiltä osin vanhentuneet. RT kortistoa ollaan parhaillaan uusimassa.

Edellä mainitut ohjeet ja esitetyt mallirakenteet perustuvat seuraaviin olettamuksiin:

- RIL126 mukaisilla salaojamateriaaleilla kapillaarinen nousukorkeus on alle 200 mm
- maapohja ei lämpene merkittävästi rakennuspohjan alapuolella.

5 Alapohjarakenteiden teoreettinen lämpö- ja kosteuskäyttäytyminen

5.1 Lämpökäyttäytymisen numeerinen mallinnus

5.1.1 Mallin verifiointi

Kappaleessa 5.1 esitetyn maamassamallin lämpötilakäyttäytymistä ja laskettuja maaparametrejä testattiin koekohteesta mitatuilla lämpötiläkäyrillä /Saarelainen, 1992/. Saarelaisen tutkimuksessa 'Modelling frost heaving and frost penetration on soils at some observation sites in Finland' oli mitattu talvikauden 1983-84 aikana Alajärveläisen tienhoitovarikon pihan pohjamaan lämpötilamuutoksia ajan ja jäätymisindeksin F funktiona. Testipaikan maakerrokset ja niihin liittyvät parametrit on esitetty taulukossa (Taulukko 5.1) yhdessä kappaleessa 5.1.2 FE-mallinnuksessa käytettyjen maaparametrien kanssa. Saarelaisen tutkimuksen lämmönjohtavuudet λ ja λ_f oli laskettu Kerstenin 1949 menetelmän mukaisesti kaavoilla

$$I = (a \cdot \log_{10} w + b) \cdot 10^{0.62rd} \quad (5.1 a)$$

$$I_f = a \cdot 10^{brd} + c \cdot 10^{0.62rd} \cdot w \quad (5.1 b)$$

missä

λ = sulan maan lämmönjohtavuus [W/mK]

λ_f = jäätyneen maan lämmönjohtavuus [W/mK]

α, β = maalajikertoimia, savilla ja silteillä $\alpha = 0.13$ $\beta = -0.029$

hiekoilla $\alpha = 0.10$ $\beta = 0.058$

a,b,c,d = maalajikertoimia, savilla ja silteillä a = 0.0014, b = 1.4, c = 0.012, d = 0.50

hiekoilla a = 0.011, b = 0.81, c = 0.046 d = 0.91

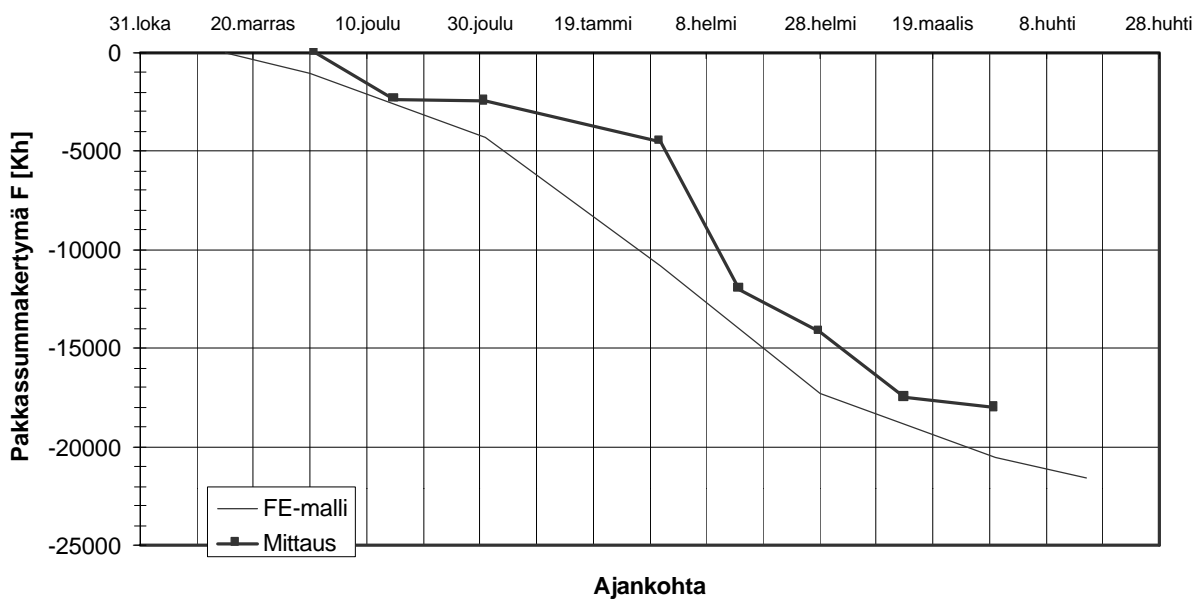
w = vesipitoisuus [%]

pd = kuivatiheys [t/m³]

Taulukko 5.1 Alajärven koekohteesta määritetyt pohjamaan ominaisuudet ja FE-mallinnuksessa käytetyt maaparametrit.

Kerros	Δz [m]	Sulamislämpö [Wh/m ³]	Lämmönjohtavuus		Vesipitoisuus w [%]	Kuivapaino ρ t/m ³
			jäätynyt λ_f [W/Km]	sula λ [W/Km]		
Moreeni	0.5	37 479	2.3	1.3	31	1.3
Hiekka	0.3	24 412	3.0	2.2	15	1.75
Siltti	1.5	37 200	2.2	1.7	25	1.6
		sulamislämpö	λ_f	λ	Ominaislämpökapasiteetti	
FE-malli		s [J/kg]	[W/Km]	[W/Km]	C_f [J/kg·°C]	C [J/kg·°C]
Moreeni	0.5	73 276	2.3	1.3	1286	2137
Hiekka	0.3	41 286	3.0	2.2	1115	1665
Siltti	1.5	71 898	2.2	1.7	1280	2156

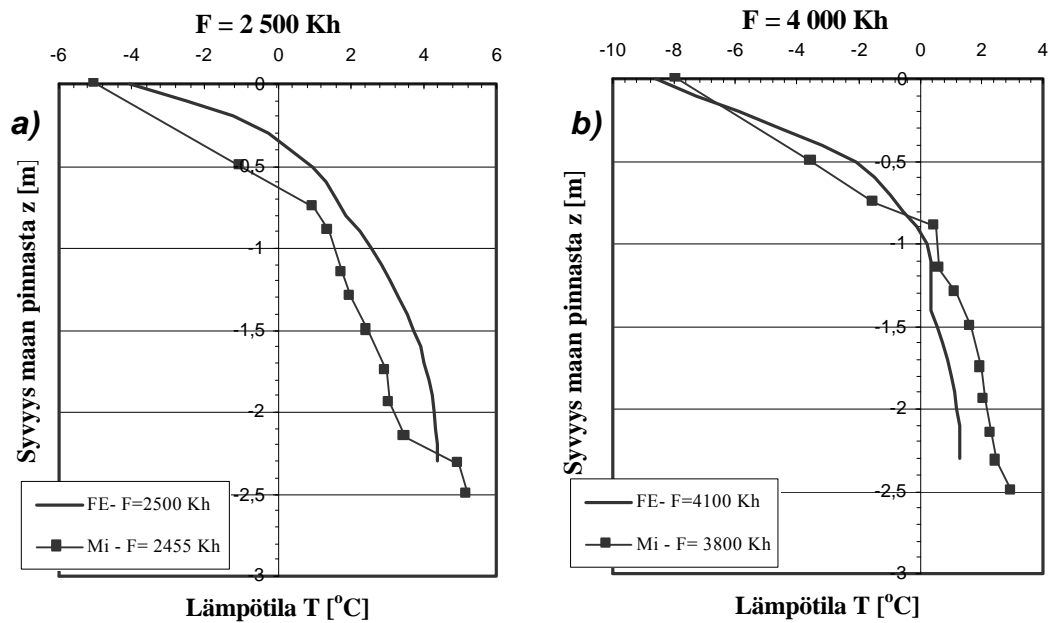
Lämpötilajakauma oli määritetty talvikaudella kolmena ajankohtana, joiden pakkassummat F olivat tiedossa. FE -malli ajettiin Alajärveläistä keskimääräistä lämpötilajakaumaa mallintavalla pintalämpötilakuormalla, jonka keskilämpötila oli $T = +2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja amplitudi $A = +12 \text{ }^\circ\text{C}$. Mallinnuksesta määritettiin koeajankohtia lähinnä vastaavien laskenta -ajankohtien lämpötilajakaumat pakkassumman F avulla. Kuvan 5.1 mukaisesti alkutalvella mallin ja mitatun pakkassumman korrelaatio oli hyvin vahva ja pakkassummien $F = 2500$ ja $F = 4000$ ajankohdat ovat hyvin lähellä toisiaan 14.2.1982 ja 18.1.1983. Kolmas vertailutulos onkin tehty tilanteessa, jossa maan lämpötila koekohteessa on mitattu 16.2.1983 ja vastaavana jakaumana FE -mallissa on käytetty ajankohtaa 30.4., jolloin pakkassummat suurin piirtein vastasivat toisiaan. Mittaustulosten ja mallinnusten välinen korrelaatio on esitetty routasyvyyden eli maassa olevan lämpötilan $0 \text{ }^\circ\text{C}$ -pisteen ja pakkassumman välisellä vertailulla taulukossa 5.2 sekä maahan muodostuvien lämpötilakäyrien vertailuna kuvissa 5.2 ja 5.3.



Kuva 5.1 Alajärven koekohteessa talvella 1982 –1983 mitattu pakkassummakertymä verrattuna FE- mallin sinikäyrän pakkassummakertymään.

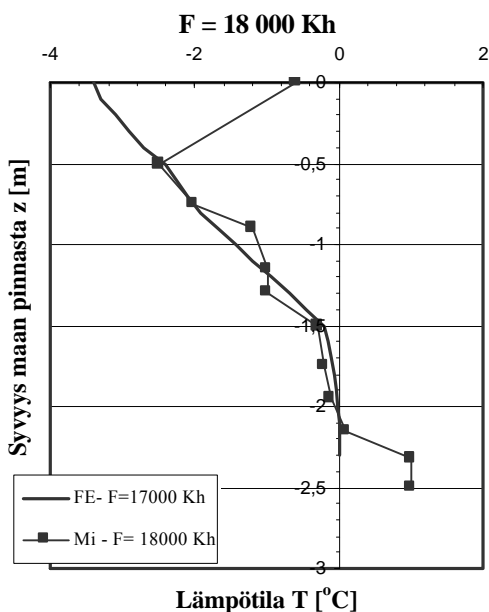
Taulukko 5.2 Mittauksissa ja mallinuksissa määritetyt routasyvyydet ja vastaavat pakkassummat.

Ajankohta F [Kh]	Pakkassumma Mittaus [Kh]	Routasyvyys Mittaus [mm]	Pakkassumma FE-malli [Kh]	Routasyvyys FE-malli [mm]
2 500 (14.12.)	2 455	620	2 500	350
4 000 (18.01.)	3 800	850	4 100	950
17 000 (24.3.)	18 000	2 050	17 000	2 050



Kuva 5.2 Alajärven koekohteesta mitatut maan lämpötiläkäyrät ja FE-mallinnoista määritetyt lämpötiläkäyrät vastaavilla pakkassumman arvoilla:

a) $F \gg 2500 \text{ Kh}$, b) $F \gg 4000 \text{ Kh}$



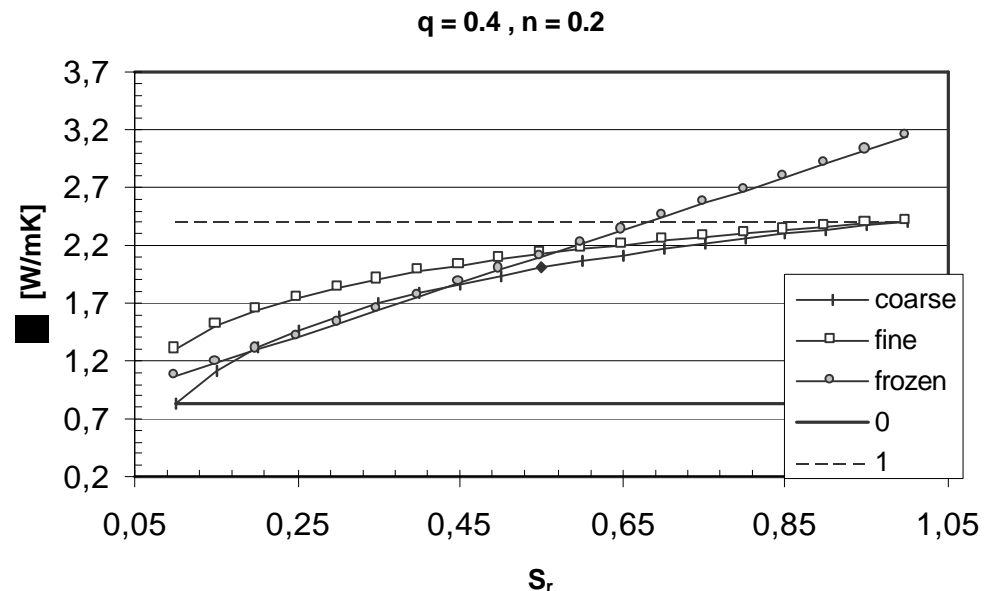
Kuva 5.3 Alajärven koekohteesta mitattu maan lämpötiläkäyrä ja FE -mallinnuksesta määritetty lämpötiläkäyrä pakkassumman ollessa $F \gg 18000 \text{ Kh}$.

Alajärven koekohteen mittaustuloksiin verrattuna suoritettujen FE -analyysien antavat riittävän tarkan kuvan maan lämpötiläkäyttäytymisestä ja veden jäätymisestä eli routasyvyydestä tutkituissa maamassoissa. Samaa maan lämpötilaparametrien määrittämistä käytettiin myös seuraavissa alapohjien alapuolisen maan lämpötiläkäyttäytymistä kartoittavissa analyysissä.

5.1.2 Lämpökäyttäytymisen numeerinen mallinnus

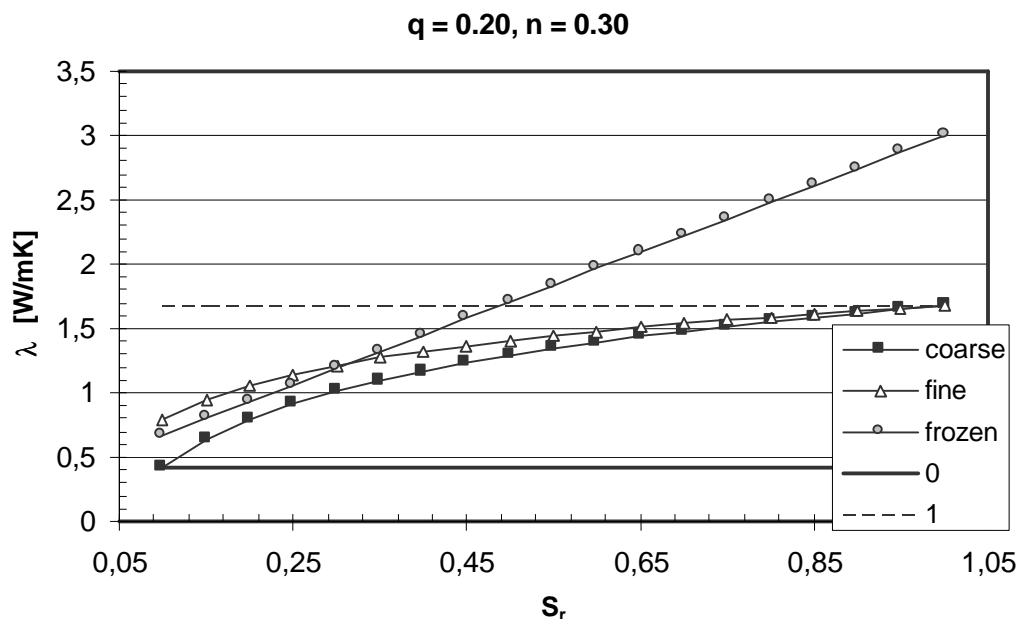
Alapohjarakenteiden termistä käyttäytymistä tutkittiin laskennallisesti käyttämällä ulkolämpötiloina keskimääräisiä ulkolämpötiloja Helsingin ja Sodankylän seudulla /Björkholtz, 1997/. Alapohjan täyttömaana käytettiin kuivaa soraa ja pohjamaana lähes kyllästynyttä ($S_r = 95\%$) silttiä.

Mallin lämmönjohtavuudet sulassa ja jäätyneessä tilassa määritettiin oletettujen kuivatiheyksien ja vesipitoisuuksien sekä mineraalirakeiden kvartsipitoisuuksien avulla Johansenin esittämien diagrammien avulla, kuvat 3.11 ja 3.12. Ominaislämpökapasiteetit määritettiin kaavan (3.28) avulla maan materiaalien tilavuusosien perusteella, samoin kuin maamassan sulamislämpö veden tilavuusosakertoimen perusteella oletetuissa kyllästysasteissa. Maamassan lämmönjohtavuus kyllästysasteen funktiona on esitetty kuvassa 5.4 massalle, jonka keskimääräinen huokosluku $n = 0.2$ ja rakeiden kvartsipitoisuus $q = 40\%$.



Kuva 5.4 Maamassan lämmönjohtavuusarvo I kyllästysasteen funktiona mineraalirakeiden kvartsipitoisuuden ollessa $q = 40\%$ ja massan huokosluvun $n = 0.20$. a) coarse : $5\% < 0.06\text{ mm}$, b) fine : $40\% < 0.06\text{ mm}$, c) frozen : jäätyneet maa, d) 0 : kuivan massan lämmönjohtavuus, d) 1 : vedellä kyllästyneen massan lämmönjohtavuus.

Maamassan lämmönjohtavuus kyllästysasteen funktiona mineraalirakeiden kvartsipitoisuuden ollessa $q = 20\%$ ja massan keskimääräisen huokosluvun $n = 0.30$ on esitetty kuvassa 5.5.



Kuva 5.5 Maamassan lämmönjohtavuusarvo λ kyllästysasteen funktiona mineraalirakeiden kvartsipitoisuuden ollessa $q = 20\%$ ja massan huokosluvun $n = 0.30$. a) coarse: $5\% < 0.06\text{ mm}$, b) fine: $40\% < 0.06\text{ mm}$, c) frozen: jäätynyt maa, d) 0: kuivan massan lämmönjohtavuus, d) 1: vedellä kyllästyneen massan lämmönjohtavuus.

Suoritetuissa mallinnuksissa maamassan rakeisuuden, rakeiden kvartsipitoisuuden ja huokosluvun vaikutusta tutkittiin varioimalla malleissa käytetyn täyttösoran lämmönjohtavuutta rajoissa $\lambda = 0.6 \dots 1.7\text{ W/mK}$ ja pohjamaa siltin lämmönjohtavuutta rajoissa $\lambda = 1.7 \dots 2.4\text{ W/mK}$ sulassa tilassa. Mallinnustapauksissa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 5.4.

Taulukko 5.3 Rakennekerrosten lämpötilaparametrit suoritetuissa analyyseissä.

Rakennemateriaali	Huokosluku n	Massan kuivatiheys δ_d [kg/m ³]	Kyllästysaste S_t [%]	Sulamislämpö s [J/kg]	Ominaislämpökapasiteetti C_p [J / kg • K] Jäätäneessä tilassa C_f [J / kg • K]	Lämmönjohtavuus λ [W / m • K] Jäätäneessä tilassa λ_f [W / m • K]	Terminen diffuusiokerroin α • 10 ⁻⁷ [m ² /s] Jäätäneessä tilassa α_f • 10 ⁻⁷ [m ² /s]
Betoni	-	2400	-	-	880	1.4	6.629
Leca-harkko	-	650	-	-	650	0.22	5.207
Eriste	-	16	-	-	1210	0.040	20.662
Tapaus A							
Sora, q = 0.4 (täyttökerros)	0.20	2000	10	3297	$C_p = 697$ $C_f = 655$	$\lambda = 0.8$ $\lambda_f = 1.1$	$\alpha = 5.738$ $\alpha_f = 8.397$
Siltti, q = 0.2 (pohjamaa)	0.20	1800	95	31794	$C_p = 1348$ $C_f = 949$	$\lambda = 2.4$ $\lambda_f = 3.0$	$\alpha = 9.891$ $\alpha_f = 17.562$
Tapaus B							
Sora, q = 0.2 (täyttökerros)	0.30	1900	15	7704	$C_p = 771$ $C_f = 676$	$\lambda = 0.6$ $\lambda_f = 0.8$	$\alpha = 4.096$ $\alpha_f = 6.229$
Siltti, q = 0.2 (pohjamaa)	0.30	1700	95	47811	$C_p = 1715$ $C_f = 1117$	$\lambda = 1.7$ $\lambda_f = 2.7$	$\alpha = 5.831$ $\alpha_f = 14.219$

Taulukon 5.3 mukaisesti täyttö - ja pohjamaan jäätyessä tai sulaessa maamassa joko luovutti tai sitoi sulamislämmön s verran energiaa massayksikköä kohden. Jäätyessään maamassan ominaislämpökapasiteetin ja lämmönjohtavuuden oletettiin muuttuvan taulukon 5.3 mukaisesti. Rakennusmateriaaleissa ei kosteuden jäätymistä otettu huomioon. Tarkastelu suoritettiin FE-menetelmällä kolmella alapohjatyyppillä: täytön varaan perustetulla asuinrakennuksen alapohjatyyppillä, jonka alapohjan lämmöneriste on joko laatan ylä - tai alapuolella, sekä tyypillisellä teollisuus - ja hallirakennuksen alapohjatyyppillä, joka on alapuolelta lämmöneristetty tai ilman lämmöneristystä. Kaikkien perustustyyppien anturat on routasuojattu. Pohjaveden korkeusasemaa vaihdeltiin asuinrakennusten alapohjatyypeillä välillä 1...3 metriä pohjalaatan alapuolella. Pohjaveden lämpötilan oletettiin pysyvän tasolla $T_{GWT} = +7\text{ °C}$ ja rakennuksen pohjalaatan pintalämpötilan tasolla $T_{SISÄ} = +21\text{ °C}$. Malliverkot ja rakennekerrokset on esitetty analysointitulosten yhteydessä. Lumikerroksen eristävää vaikutusta maanpinnalla talvikuukausina ei otettu huomioon.

Ulkolämpötilan käyttäytymisen oletettiin noudattavan ulkoilman kuukausittaisista keskilämpötiloista määritettyä sini-muotoista käyrää (kuva 5.6, kaava 5.2):

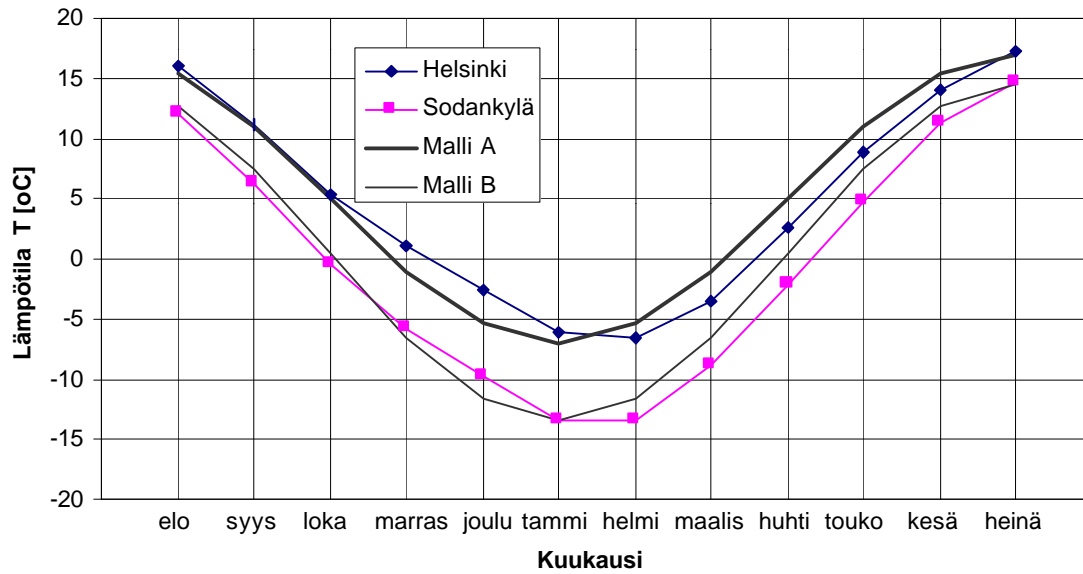
$$T_{ulko}(t) = T_0 + T_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right) \quad (5.2)$$

missä

T_0 = vuoden keskilämpötila (= +5 °C Helsingissä, = +0.5 °C Sodankylässä)

T_1 = lämpötilavaihtelun amplitudi vuoden jaksolla
 (= + 12° C Helsingissä, = + 14° C Sodankylässä)

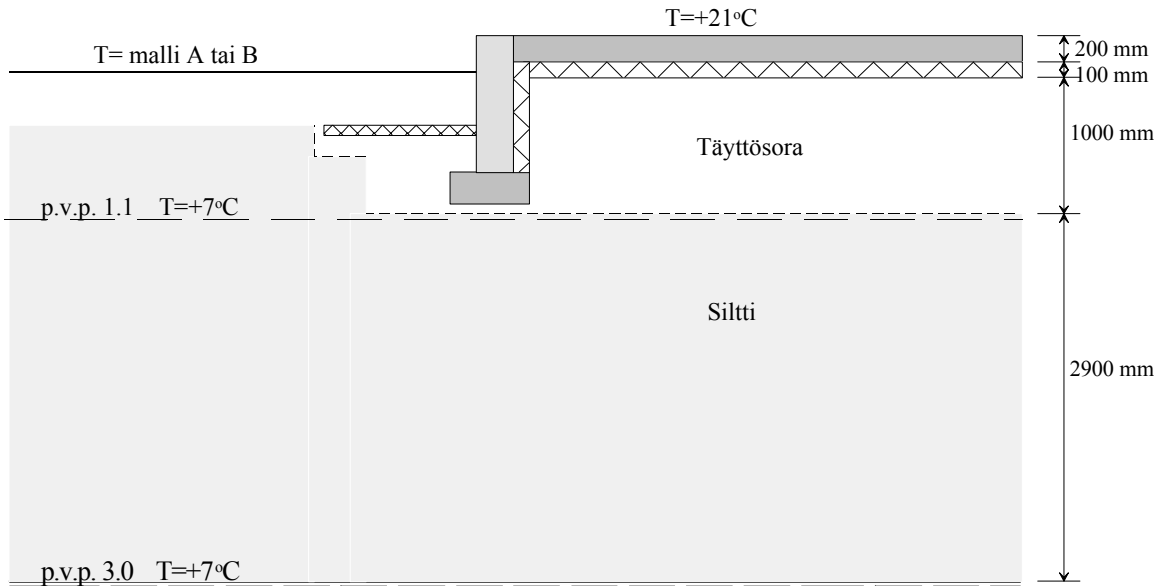
t_0 = 1 vuosi (= 31.536.000 s)



Kuva 5.6 Ulkolämpötilan 1 vuoden keskimääräiset kuormafunktiot Suomessa Helsingin ja Sodankylän korkeudella, sekä numeerisissa mallinuksissa käytetyt vastaavat sinifunktiot, malli A ja malli B.

5.1.2.1 Alapuolelta lämpöeristetty täytölle perustettu alapohja – Tyyppi I

Alapuolelta lämmöneristetyn täytölle perustetun alapohjan rakennekerrokset on esitetty kuvassa 5.7. Kerrosten materiaalit ja termiset parametrit ovat taulukon (Taulukko 5.3) mukaisia.



Kuva 5.7 Alapuolelta lämmöneristetyn täytölle perustetun alapohjan rakennekerrokset ja analyyseissä käytetyt lämpökuormat.

Pohjarakenteiden termiset analyysit suoritettiin sekä muuttuvalle 1 vuoden lämpökuormille, että pitkäaikaiselle 15 vuoden keskimääräiselle lämpökuormalle. Molemmissa tapauksissa ulkolämpötila noudatti kuvan 5.6 vuotuista lämpökäyrää. Mallinnus suoritettiin sekä Helsingin että Sodankylän lämpötilaolosuhteissa. Alapohjalaatan yläpinnan lämpötilan oletettiin olevan tasaisesti $+21\text{ °C}$ ja tapauksissa, joissa virtaavan pohjaveden pinnan viilentävä vaikutus otettiin huomioon, vesimassan lämpötilaksi oletettiin $T_{\text{GWT}} = +7\text{ °C}$. Lähtötilanteessa kaikkien maamassojen ja rakenteiden oletettiin olevan lämpötilassa $T = +5\text{ °C}$.

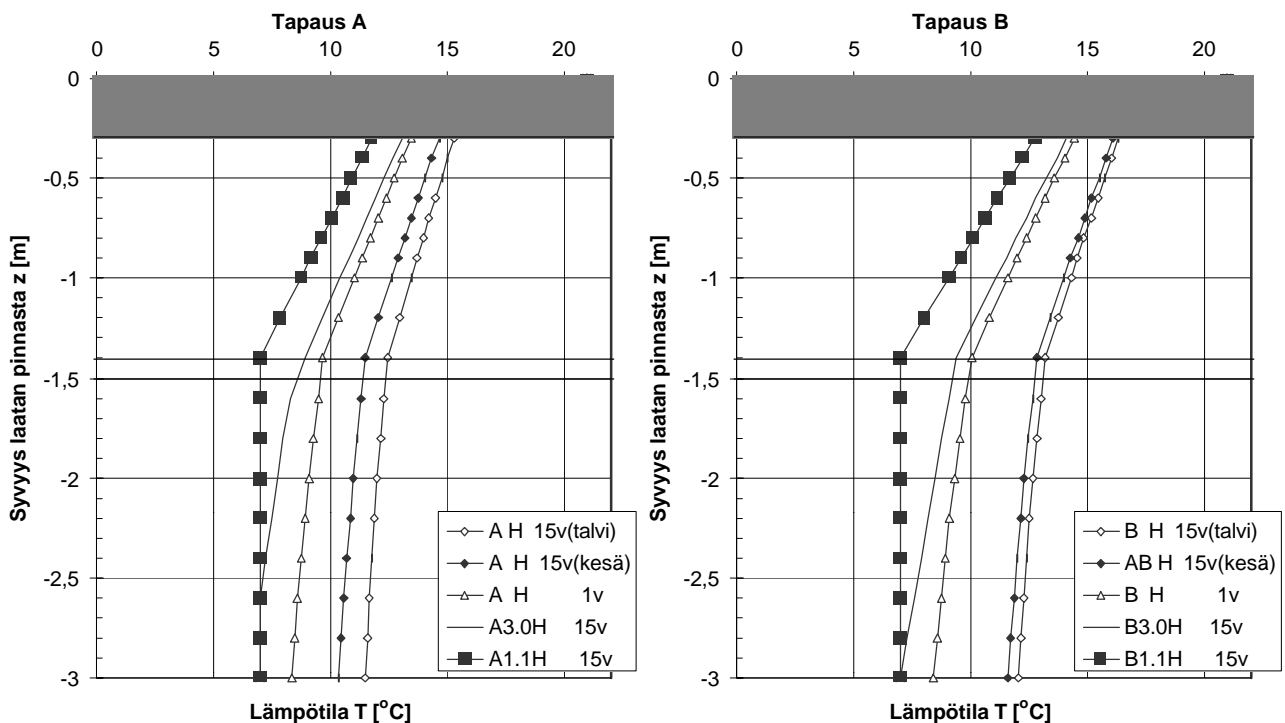
Helsingin seutu

Helsingin seudun olosuhteissa lasketut tapaukset on esitetty taulukossa (Taulukko 5.4). Analyysissa varioitiin pohjaveden korkeusasemaa betonilaatan alapinnasta välillä 1,1 m - ∞ sekä pohjamaan lämmönjohtavuutta ja ominaislämpökapasiteettia lasketuilla soran ja siltin parametreilla tapauksissa A ja B (Taulukko 5.3).

Taulukko 5.4 Pohjatyyppillä I lasketut tapaukset Helsingin seudun keskimääräisissä olosuhteissa.

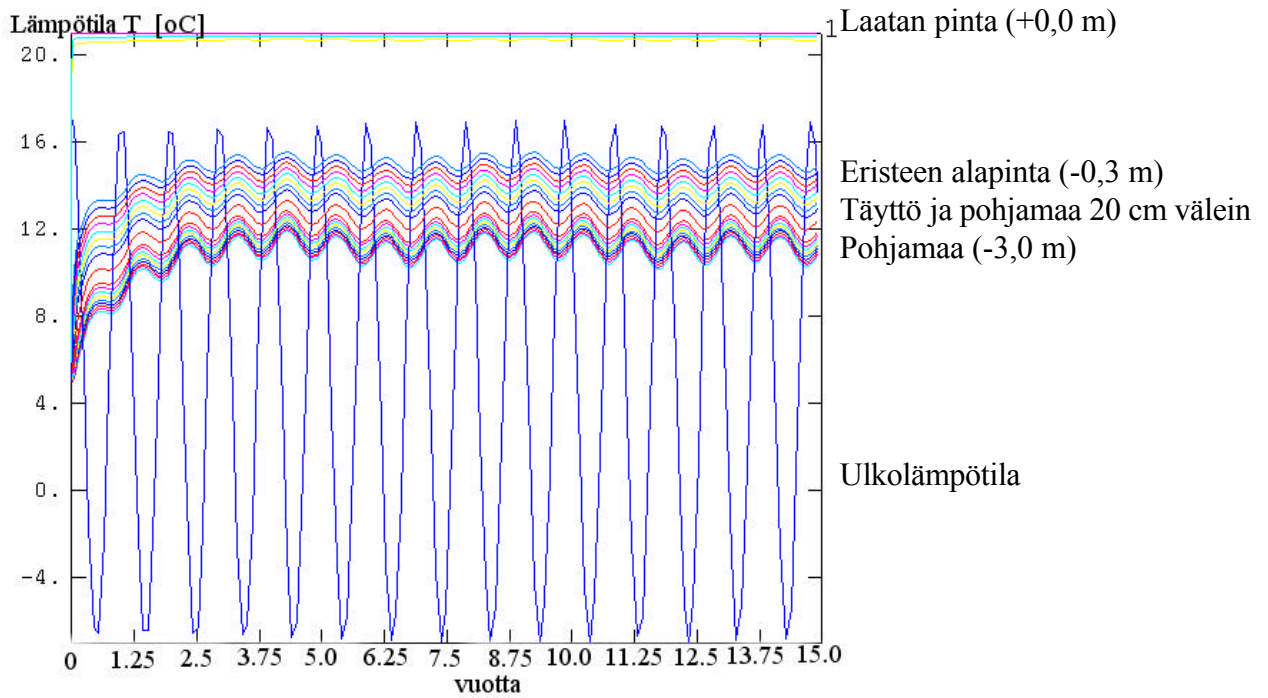
Laskentatapaus	Pohjaveden korkeusasema alapohjalaatan pinnasta [m]	Pohjamaa [parametrit taulukossa 5.3]	Olosuhteet [lämpötila kuvassa 5.5]
IA1.1H	1.1	A	Helsinki
IA3.0H	3.0	A	Helsinki
IA ∞ H	∞	A	Helsinki
IB1.1H	1.1	B	Helsinki
IB3.0H	3.0	B	Helsinki
IB ∞ H	∞	B <td>Helsinki</td>	Helsinki

Kuvassa 5.8 on esitetty Helsingin lämpöolosuhteissa tehtyjen analyysien mukaiset alapohjan lämpötiläkäyrät laatan keskipisteessä pohjatyyppillä I.

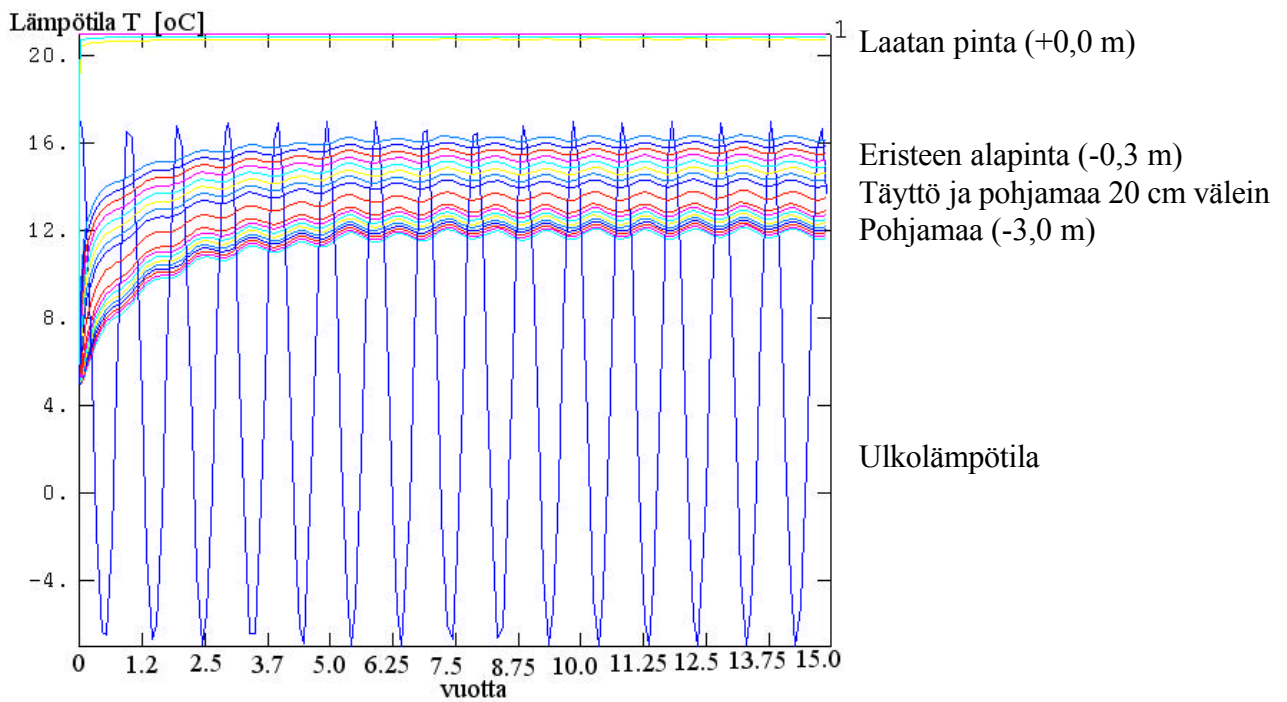


Kuva 5.8 Lämpötilat laatan keskipisteen alapuolella laskentatapauksilla A ja B, alapohjatyyppi I.

Kuvassa 5.9 on esitetty laatan keskipisteen alapuolisten maakerrosten lämpötilavaihtelut 15 vuoden aikana laskentatapauksessa IA ∞ H. Kuvassa 5.8 on esitetty samojen pisteiden lämpötilavaihtelut mallilla IB ∞ H.

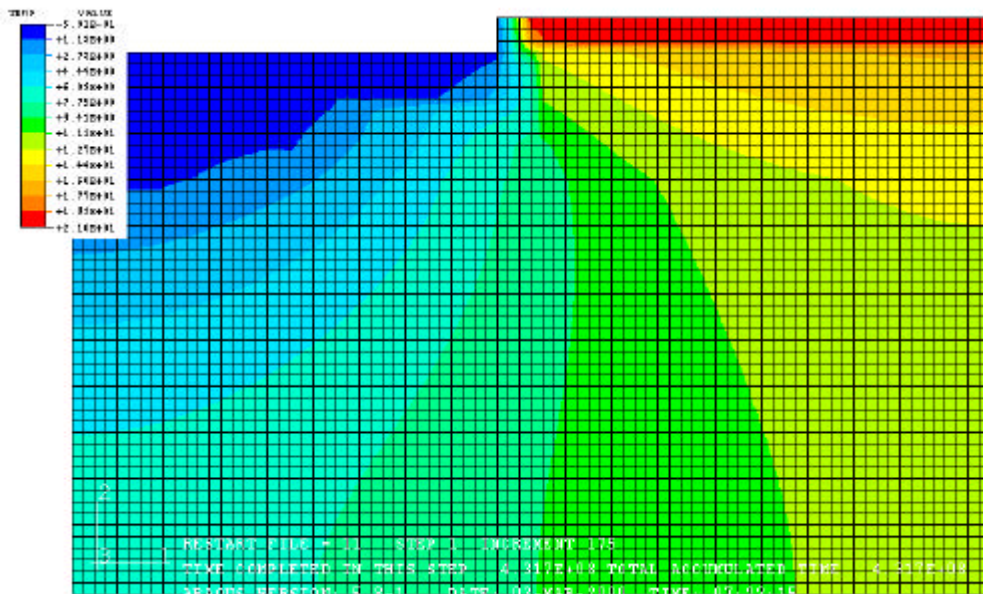


Kuva 5.9 Laatan keskipisteen alapuolisten maakerrosten lämpötilavaihtelut 15 vuoden aikana laskentatapauksella IA ∞ H .

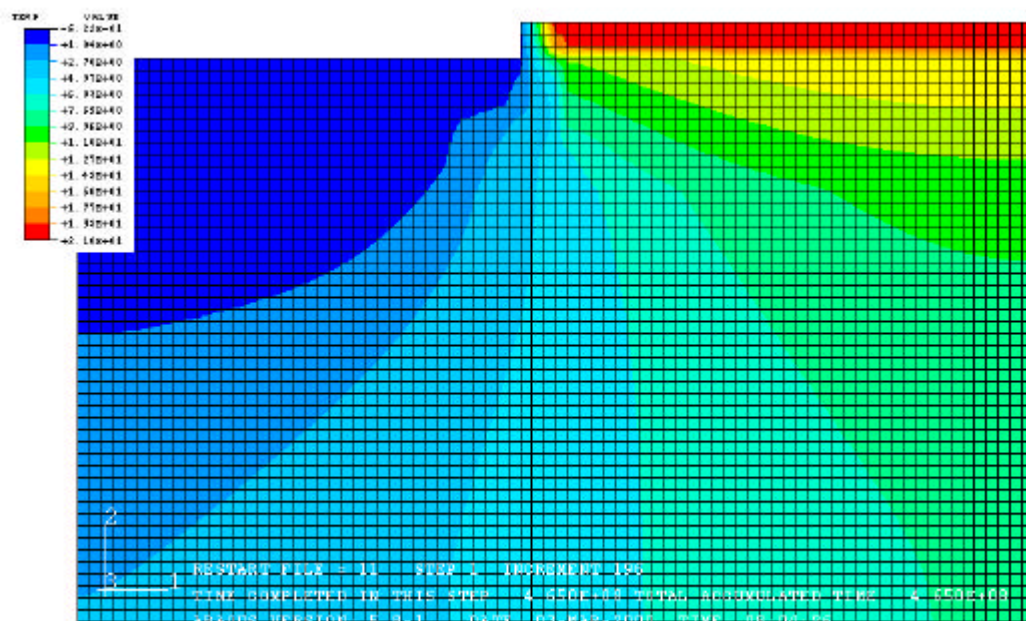


Kuva 5.10 Laatan keskipisteen alapuolisten maakerrosten lämpötilavaihtelut 15 vuoden aikana laskentatapauksella IB ∞ H .

Kuvassa 5.11 on esitetty lämpötilajakaumat tutkitussa alapuolelta lämpöeristetyin alapohjan leikkauksessa IB∞H 15 vuoden lämpösunnan jälkeen.



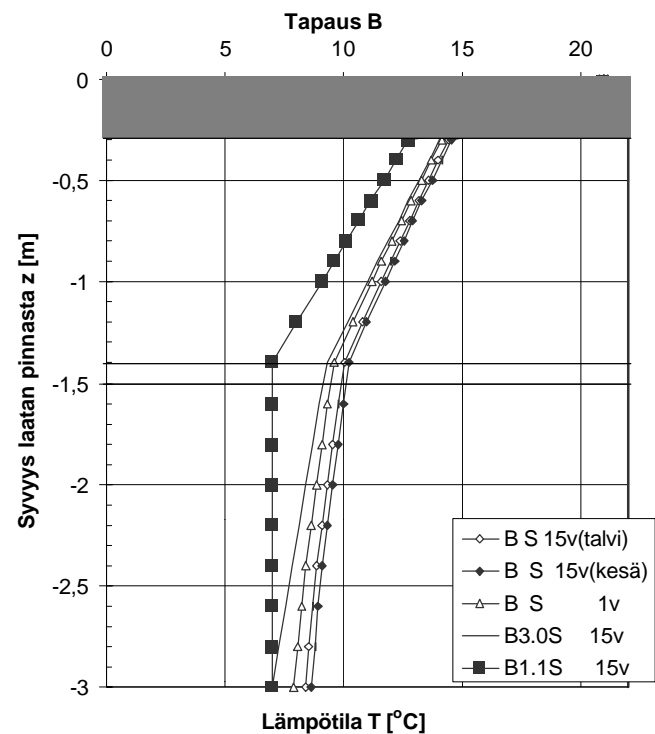
Kuva 5.11 Alapuolelta lämpöeristetyin täytölle perustetun alapohjan lämpötilajakauma tapauksella IB∞H 15 vuoden lämpösunnan jälkeen.



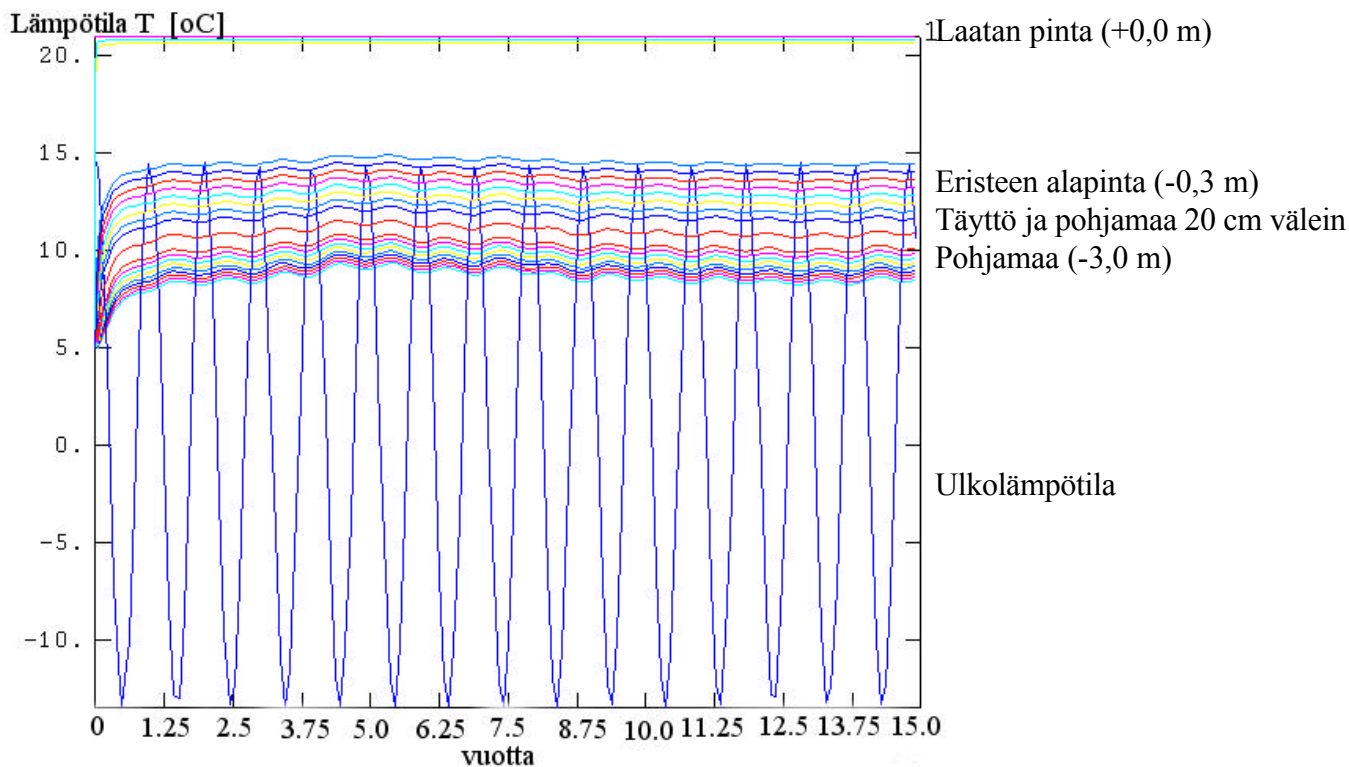
Kuva 5.12 Alapuolelta lämpöeristetyin täytölle perustetun alapohjan lämpötilajakauma tapauksella IB∞S 15 vuoden lämpösunnan jälkeen.

Sodankylän seutu

Kuvassa 5.13 on esitetty maapohjan lämpötilat laatan keskipisteen alapuolella eri laskentatapauksilla ulkolämpötilan noudattaessa mallin B mukaista Sodankylän alueen keskimääräistä ulkolämpötilaa. Kuvassa 5.12 on esitetty lämpötilajakauma tutkitussa leikkauksessa IB ∞ S 15 vuoden lämpösumman jälkeen. Laskennoissa ei otettu huomioon lumipeitteen eristävää vaikutusta.



Kuva 5.13 Lämpötilat laatan keskipisteen alapuolella eri laskentatapauksilla Sodankylän korkeudella laskentatapauksella B.



Kuva 5.14 Laatan keskipisteen alapuolisten maakerrosten lämpötilavaihtelut 15 vuoden aikana lasketatapaüksessa IBYS. Lumen eristävää vaikutusta ei ole otettu huomioon.

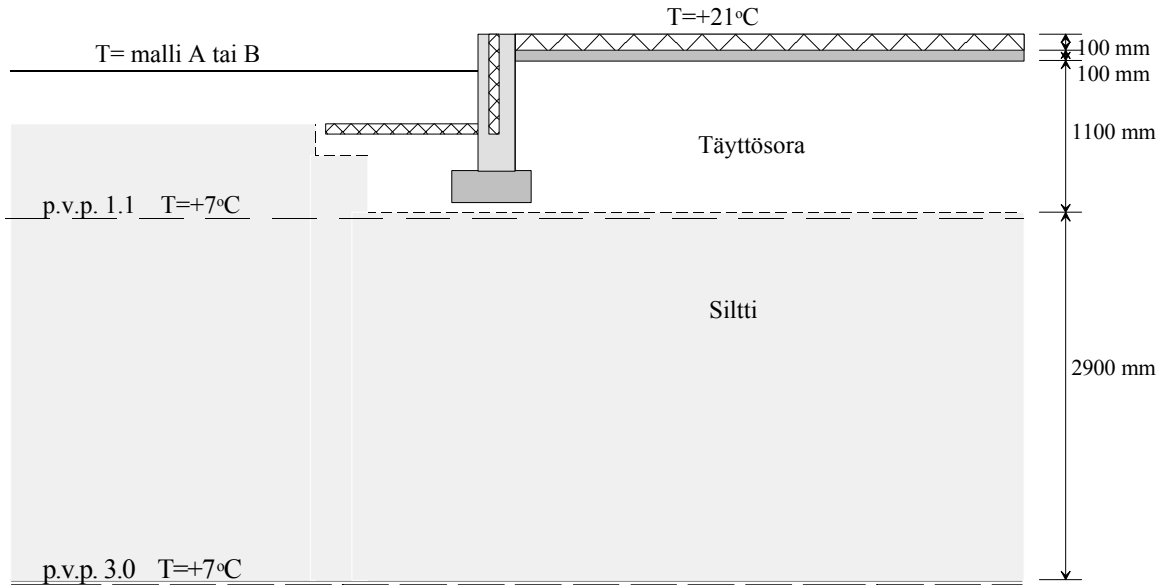
5.1.2.2 Yläpuolelta lämpöeristetty täytölle perustettu alapohja – Tyyppi II

Yläpuolelta lämmöneristetyin täytölle perustetun alapohjan rakennekerrokset on esitetty kuvassa 5.15. Kerrosten lämpötilaparametrit vastaavat taulukon 5.3 arvoja.

Helsingin seudun olosuhteissa lasketut tapaukset on esitetty taulukossa (Taulukko 5.5) Analyysseissa varioitiin pohjaveden korkeus asemaa betonilaatan alapinnasta välillä 1,1 m - ∞.

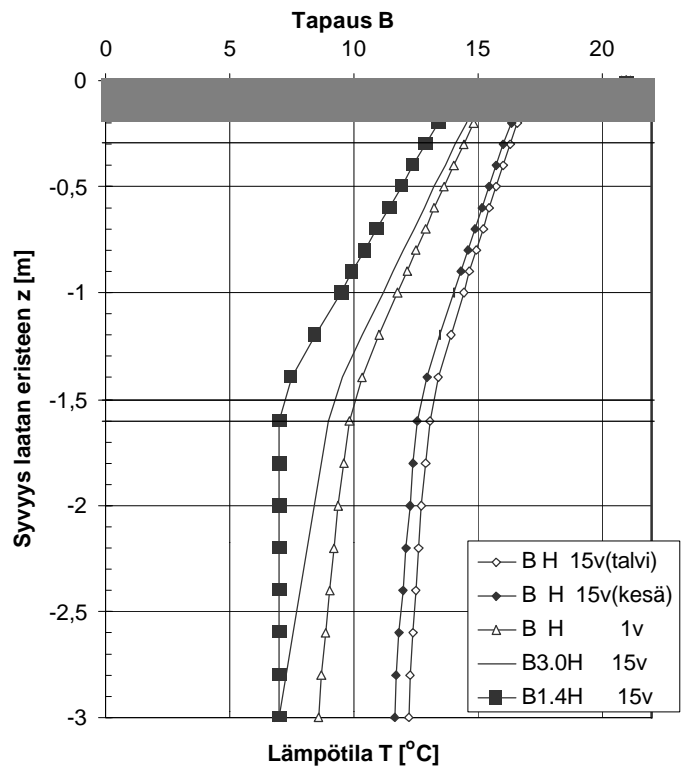
Taulukko 5.5 Pohjatyypillä II lasketut tapaukset Helsingin seudun keskimääräisissä olosuhteissa.

Lasketatapaus	Pohjaveden korkeusasema alapohjalaatan pinnasta [m]	Pohjamaa [parametrit taulukossa 3.3]	Olosuhteet [lämpötila kuvassa 3.1]
IIB1.1H	1.1	B	Helsinki
IIB3.0H	3.0	B	Helsinki
IIB∞H	∞	B	Helsinki



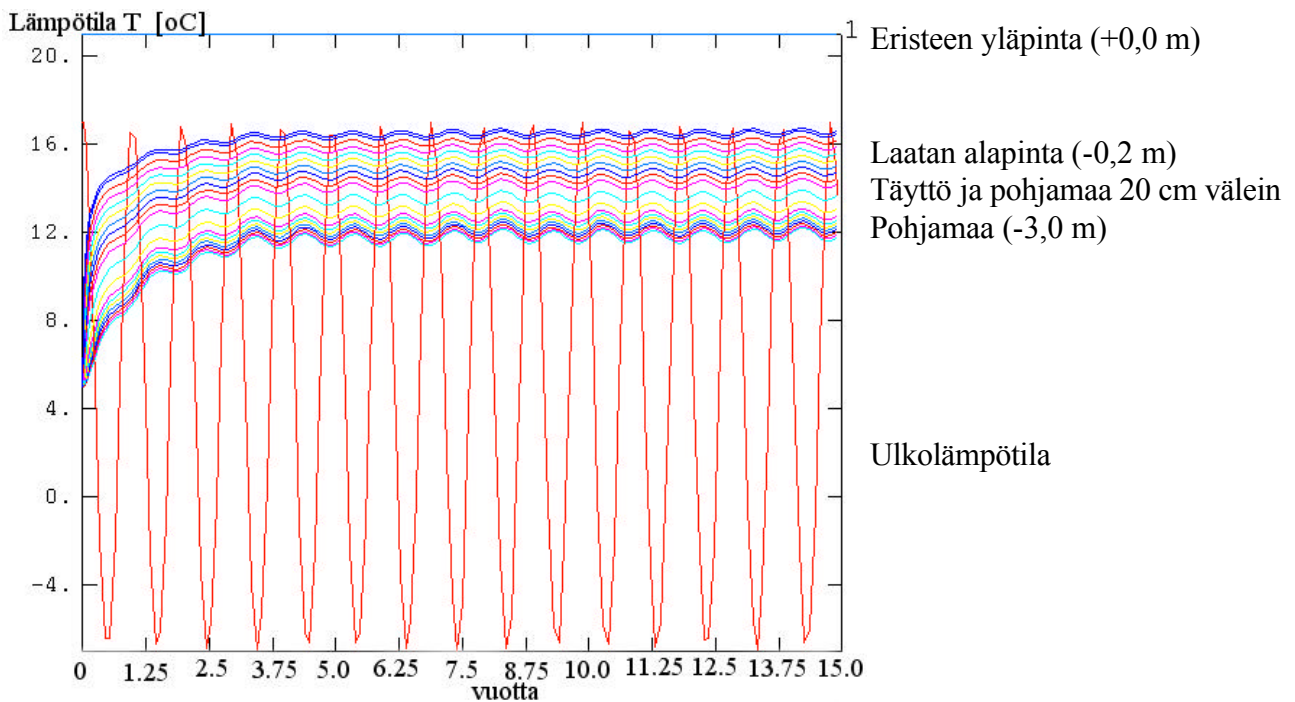
Kuva 5.15 Yläpuolelta lämpöeristetyin täytölle perustetun alapohjan rakennekerrokset ja analyyseissä käytetyt lämpökuormat.

Kuvassa 5.16 on esitetty laskentatapauksen yläpuolelta lämpöeristetyin täytölle perustetun laatan lämpötilajakauma laatan keskipisteen alapuolella pohjamaan laskentatapauksella B.

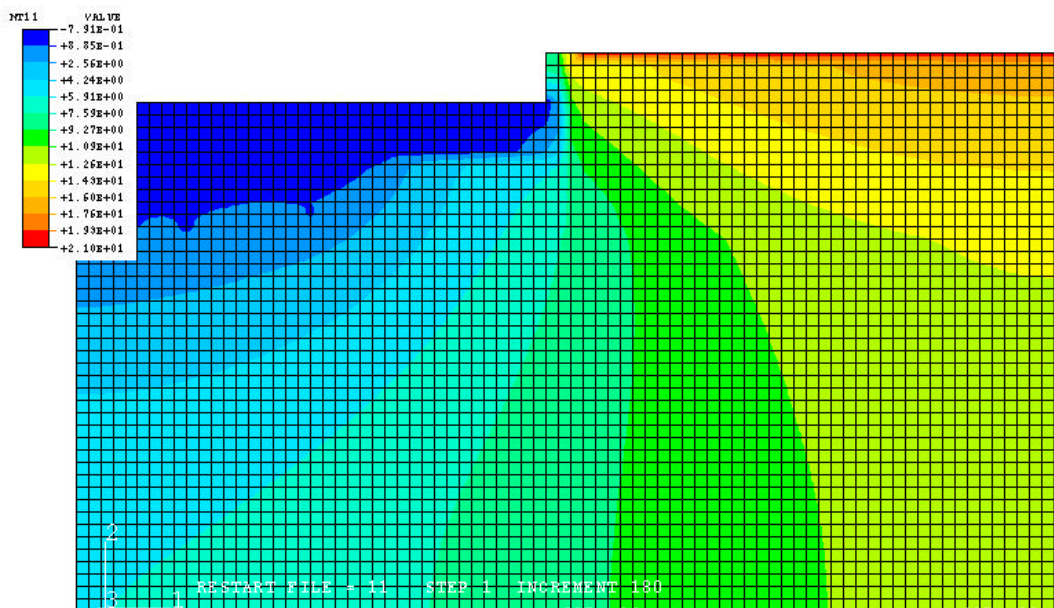


Kuva 5.16 Alapuolelta lämpöeristetyin täytölle perustetun alapohjan lämpötilat laatan keskipisteen alapuolella. Pohjamaan parametrit taulukon 5.3 tapauksen B mukaisia.

Kuvassa 5.17 on esitetty lämpötilan muutokset laatan keskipisteen alapuolella 15 vuoden aikana muuttuvan ulkolämpötilakuorman aikana ja kuvassa 5.18 tutkitun poikkileikkauksen IIB ∞ H lämpötilajakauma talvella 15 vuoden lämpösumman jälkeen.



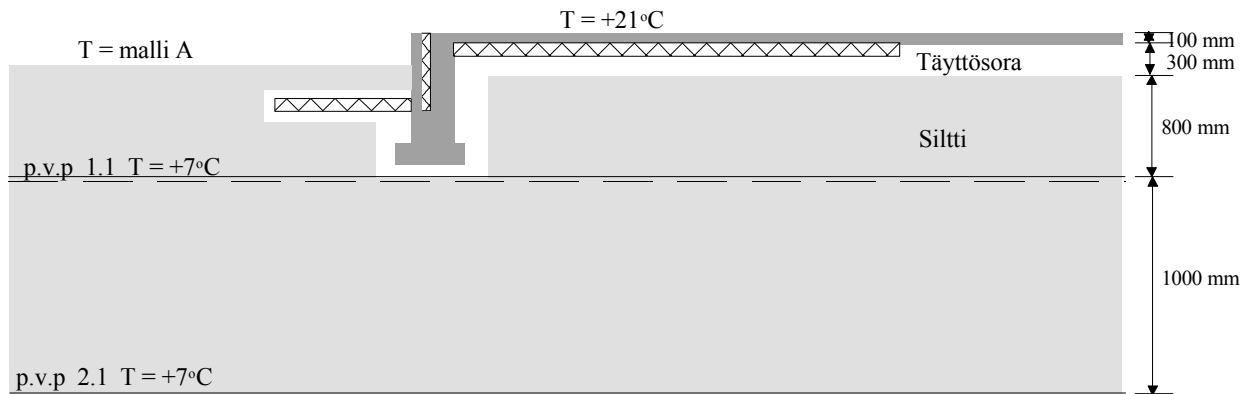
Kuva 5.17 Laatan keskipisteen alapuolisten maakerrosten lämpötilavaihtelut 15 vuoden aikana laskentatapauksessa IIB ∞ H.



Kuva 5.18 Lämpötilat laatan keskipisteen alapuolella eri laskentatapauksilla Helsingin korkeudella pohjamaatyypillä IIB ∞ H.

5.1.2.3 Teollisuushallin osittain lämpöeristetty alapohja – Tyyppi III

Teollisuushallin osittain lämpöeristetyin alapohjan rakennekerrokset on esitetty kuvassa 5.19. Leikkaukseen liittyvät materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 5.3 .



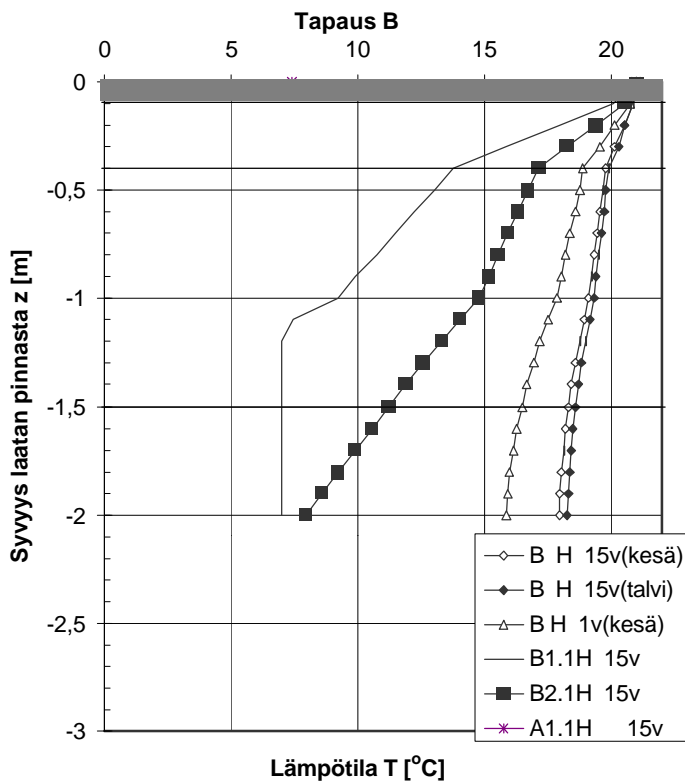
Kuva 5.19 Teollisuushallin osittain lämpöeristetyin alapohjan rakennekerrokset ja lämpökuormat.

Taulukko 5.6 Pohjatyypillä III lasketut tapaukset Helsingin seudun keskimääräisissä olosuhteissa

Laskentatapaus	Pohjaveden korkeusasema alapohjalaatan pinnasta [m]	Pohjamaa [parametrit taulukossa 3.3]	Olosuhteet [lämpötila kuvassa 3.1]
IIIB1.1H	1.1	B	Helsinki
IIIB2.1H	3.0	B	Helsinki
IIIB∞H	∞	B	Helsinki

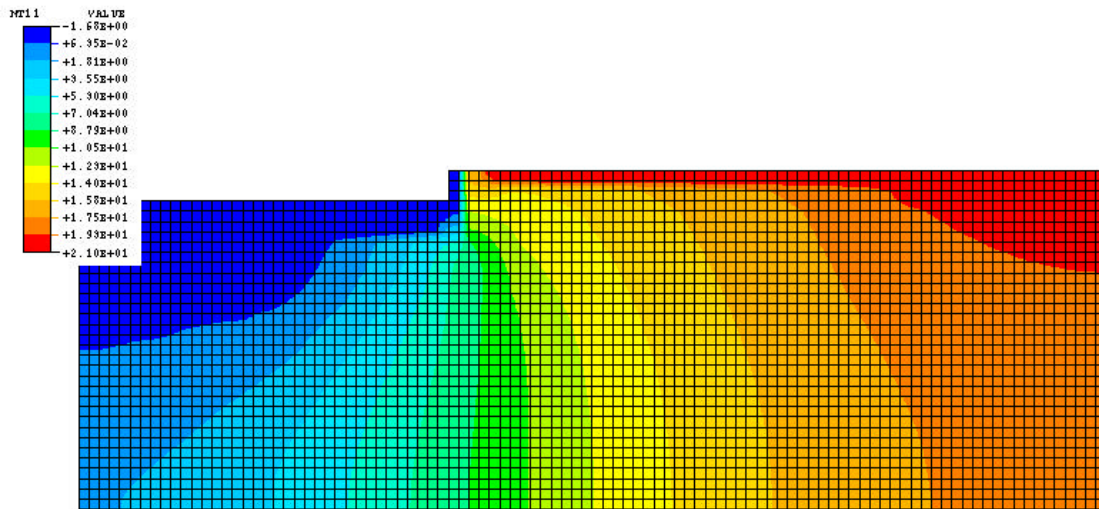
Helsingin seudun olosuhteissa lasketut tapaukset on esitetty taulukossa (Taulukko 5.4). Analyysissä varioitiin pohjaveden korkeusasemaa betonilaatan alapinnasta välillä 1,1 m - ∞. Pohjamaan lämmönjohtavuutena ja ominaislämpökapasiteettina käytettiin tapauksen B siltin ja täyttösoran parametrejä (taulukko 5.3).

Kuvassa 5.20 on esitetty lämpötilajakaumat laatan keskipisteen alapuolella eri laskentatapauksilla pohjamaatyypillä B ja ulkolämpötilan noudattaessa Helsingin alueen keskimääräistä ulkolämpötilaa.

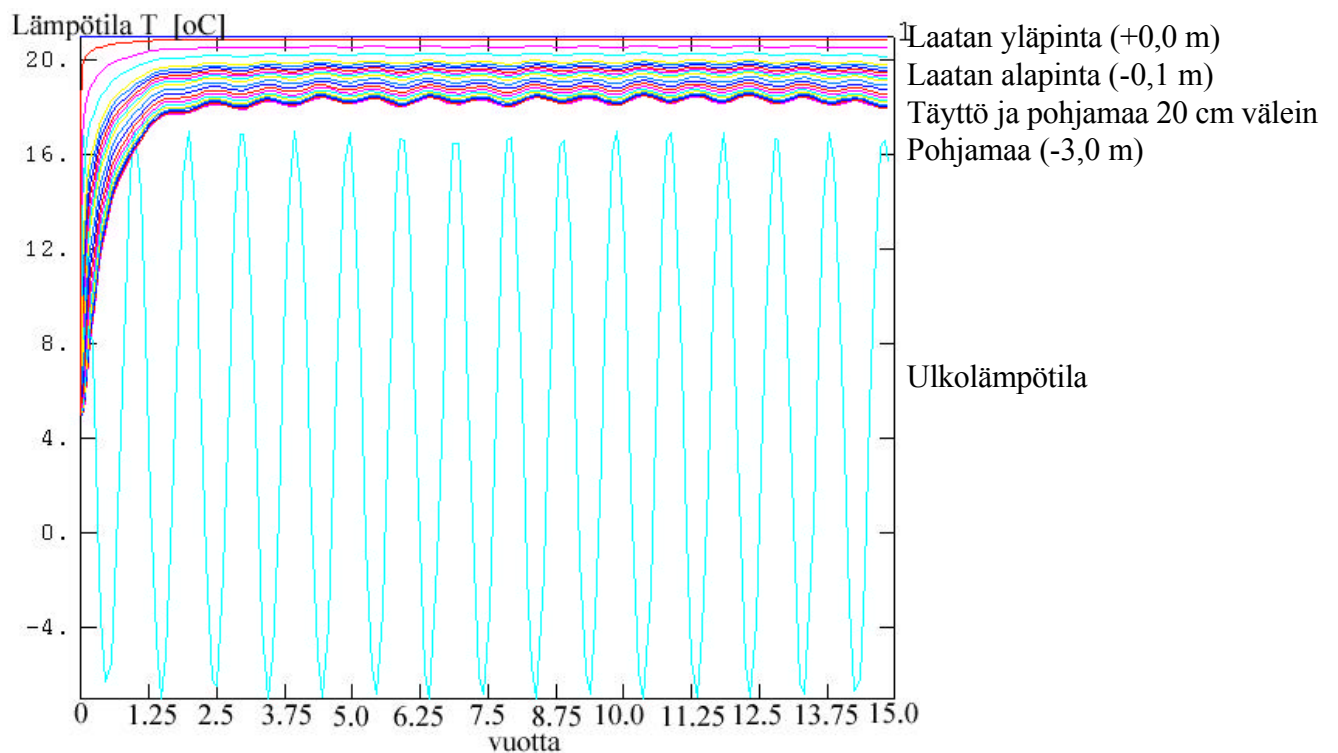


Kuva 5.20 Lämpötilat laatan keskipisteen alapuolella eri laskentatapauksilla Helsingin korkeudella pohjamaatyypillä B.

Kuvassa 5.21 on esitetty lämpötilajakauma osittain lämpöeristetyin alapohjan III B ∞ H alapuolella 15 vuoden kuluttu rakentamisesta. Maamassojen ja rakenteiden alkulämpötila $T_0 = +5$ $^{\circ}\text{C}$. Kuvassa 5.22 nähdään rakennetyypin III B ∞ H lämpötilan muutokset 15 vuoden aikana eristämättömän laatan alapuolella hallin keskilinjalla.



Kuva 5.21 Osittain lämpöeristetyin teollisuushallin alapohjaleikkauksen IIB¥H lämpötilajakauma talvella 15 vuoden kuluttua rakentamisesta.

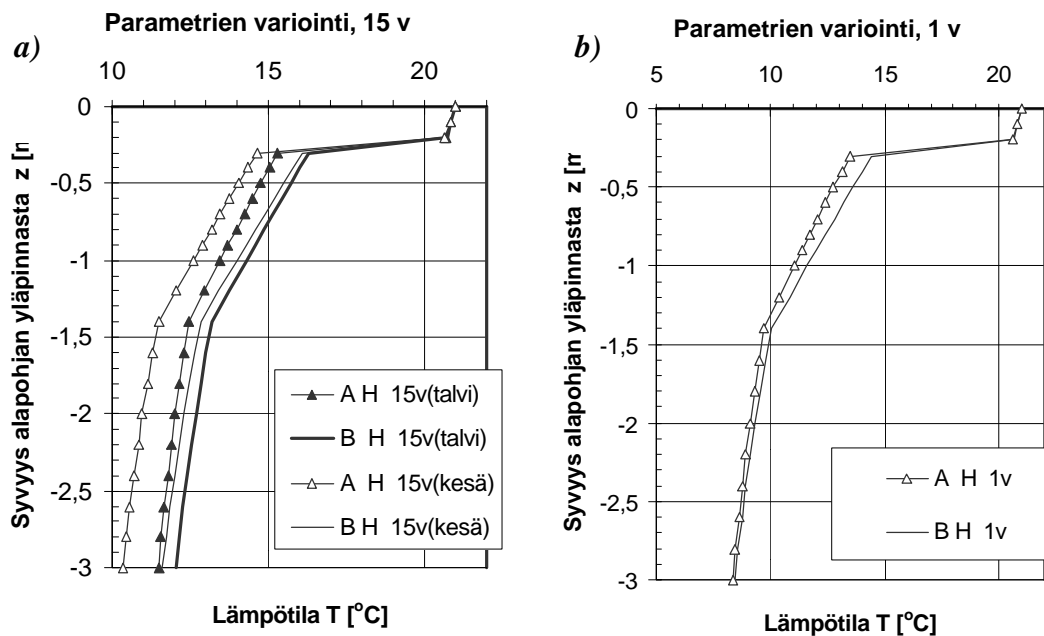


Kuva 5.22 Laatan keskipisteen alapuolisten maakerrosten lämpötilavaihtelut 15 vuoden aikana laskentatapauksessa IIB¥H.

5.1.3 Yhteenvedo numeerisista mallinnoista

Suoritetuissa numeerisissa mallinnoissa laatan alapuolisen sorakerroksen oletettiin olevan suhteellisen kuivaa ja tästä johtuen massan lämmönjohtavuudeksi oletettiin $\lambda \approx 1 \text{ W/Km}$. Olettamalla soran lämmönjohtavuus tasolle $\lambda = 2 \text{ W/Km}$ laatan alapuolisen maamassan yläkerrosten lämpötila alenee muutaman asteen, mutta massa lämpiää tasaisemmin ja syvemmälle kuin lasketuissa malleissa.

Suoritetuissa soratäytön ja pohjamaan lämpöparametrien varioinneissa saadut lämpötilajakauman rajat pohjatyypillä I, kun pohjaveden vaikutusta ei ole otettu huomioon on esitetty kuvassa 5.23. 15 vuoden lämpösumman jälkeen täyttösoran lämpötila oli 11 – 16.6°C. Soran lämpötila pohjamaan rajapinnassa oli kaikissa tapauksissa yli 11 Celsius - astetta. Eristeen alapinnan lämpötila oli keskimäärin 15.5°C. Sorakerros saavutti lämpötasansa suhteellisen nopeasti suoritetuissa analysoinneissa. Massan alkulämpötilan ollessa $T_0 = +5 \text{ °C}$ sorakerros lämpeni tasapainotilaansa 2...3 vuodessa kaikissa lasketuissa tapauksissa. Yhden vuoden kuluttua lämpökuorman alkamisesta täyttösoran yläpinnan lämpötila oli vielä noin 2°C astetta lopullista tasapainotilaa alempi.

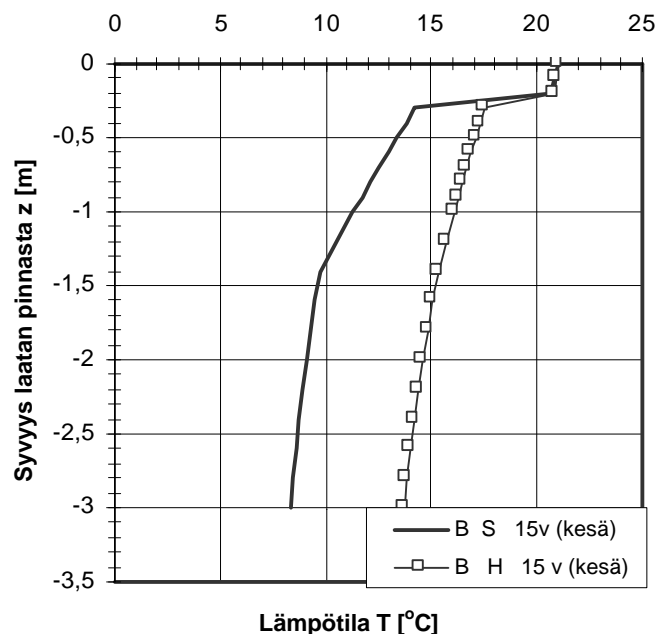


Kuva 5.23 Lämpötilajakauman raja-arvot suoritetuissa mallinnoissa alapohjatyypillä I Helsingin olosuhteissa. a) 15 vuoden kuluttua, b) 1 vuoden kuluttua. Pohjaveden syvyys $\approx 3 \text{ m}$.

Maaparametrien varioinnilla tapausten A ja B välillä oli keskimäärin 2 °C vaikutus pohjamaan lopullisiin lämpötilajakaumiin. Maamassan lämmönjohtavuuden kasvattaminen huokoslukua pienentämällä ja samalla massassa olevan veden määrää pienentämällä nosti massan termistä diffuusiokerrointa, mikä näkyi suoritetuissa analyyseissä voimakkaampana reagoitina ulkolämpötilan muutoksiin (kuva 5.9). Maamassan lämpötila jäi samalla tapauksen B jakaumaa alhaisemmaksi ja kesä- ja talvikauden lämpötilajakauman ero on selvästi havaittavissa. Maamassan huokoslukua kasvattamalla ja veden määrää lisäämällä termiset diffuusiokerroimet pienenevät ja massa reagoi selvästi heikommin ulkolämpötilan muutoksiin.

(kuva 5.10). Samalla täyttökerroksen lämpötila kohoaa muutamia asteita tapauksen A lukemia korkeammaksi.

Ulkolämpötilan noudattaessa Sodankylän vuotuista lämpökäyrää (malli B), alapohjan lämpötilajakauma jäi selvästi Helsingin seudun vastaavia alemmaksi. Samalla vuotuinen vaihtelu lämpöjakaumassa jäi vähäiseksi ja tasapainotila saavutettiin nopeammin, noin 1.5 vuodessa (kuva 5.14). Alapohjan alapuolisen täyttökerroksen lämpötila oli silti keskimäärin $+12^{\circ}\text{C}$. Sodankylän lämpöolosuhteissa alapohjan lämpötila jää keskimäärin 5 astetta matalammaksi kuin Helsingin olosuhteissa (kuva 5.24). Sodankylän pakkassumman maksimiarvo käytetyssä mallissa oli $F \approx 32\,000\text{ Kh}$ ja Helsingin vastaava arvo $F = 15\,000\text{ Kh}$. Suurempi pakkassumma viilentää oleellisesti alapohjaa, mikäli maan pintalämpötila vastaa kuvan 5.1 kuormituskäyriä. Sodankylän korkeudella talven lumipeitteen paksuus ja samalla sen eristävä vaikutus on kuitenkin huomattavasti suurempi kuin etelämpänä. Tästä johtuen Sodankylän maan lämpötilaan vaikuttava tehokas pakkassumma on luultavasti jopa usein läpi talven lumettoman etelärannikon tehokasta pakkassummaa alempi.



Kuva 5.24 Pohjamaan lämpötilajakaumat 15 vuoden kuluttua Helsingin (H) ja Sodankylän (S) olosuhteissa. Lumen eristävää vaikutusta ei ole otettu huomioon. Vuotuinen pakkassumma mallissa Sodankylässä oli $F \approx 32\,000\text{ Kh}$ ja Helsingissä $F \approx 15\,000\text{ Kh}$.

Eristekerroksen ollessa pohjalaatan yläpinnassa alapohjatyypissä II täyttösoraa muodostuvat lämpötilajakaumat vastasivat tyypin I jakaumia. 15 vuoden lämpösomman jälkeen sorakerroksen yläpinnan lämpötila laatan ala oli noin $+16.5^{\circ}\text{C}$ astetta pohjamaatyypillä B ja kerroksen lämpötila siltä rajapinnassa noin $+13^{\circ}\text{C}$ (kuva 5.14). Samoin tasapainotilan saavuttaminen täyttökerroksissa kesti noin 2.5 vuotta (kuva 5.15).

Suoritettujen analyysien perusteella alapohjalaatan lämmöneristyksen vaikutus alapuolisen pohjamaan lämpenemiselle on varsin selvä. Maakerrosten ja pohjalaatan lämpötilaero d

= 100 mm, $\lambda = 0.040$ W/mK lämpöeristeellä on noin 3 ... 4 Celsius –astetta vielä 15 vuoden kuluttua rakennuksen pohjalaatan lämpökuormituksen alkamisesta. Ulkoilman lämpötilan vuodenaikaisvaihtelut näkyvät routaeristetyillä anturoilla kierretty n pohjalaatan keskiosissa vain muutaman asteen kymmenyksen muutoksina. Alapohja on kylminä talvikuukausina hieman lämpimämpi kuin kesällä, jolloin lämpövuoro routaeristetyn anturan ali on pienemmästä lämpötilaerosta johtuen vähäisempää. Eristämättömällä alap ohjalaatalla pohjamaan lämpötila nousee alle vuodessa samalle tasolle kuin pohjalaatankin lämpötila, eikä minkäänlaista kosteusdiffuusiota estävää lämpötilaporrasta pääse muodostumaan. Lisäksi maapohjan lämpeneminen jatkuu melko syvälle, varsinkin jos pohjaveden pinta on kaukana pohjalaatasta tai pohjavesi virtauksen puuttuessa ei viilennä yläpuolisia maakerroksia. Mikäli virtaamattoman pohjavesimassan yläpinta on lähellä alapohjarakenteita, lämpövuoro todennäköisesti ajan mittaan lämmittää myös pohjavesimassaa.

5.2 Alapohjarakenteiden lämpötila- ja diffuusiolaskelmat stationääritilassa

Stationääritilassa (kosteusvirta ei ole ajasta riippuva) alapohjarakenteessa tapahtuva diffuusio voidaan laskea esim. lähteessä /Björkholz, 1997/ esitetyillä kaavoilla (vrt. luku 3.2.3) kun tiedetään rakenteen lämpötila- ja kosteusjakauma.

5.2.1 Laskelmissa käytetyt kaavat

Lämpötila ja k-arvo

$$k = \frac{1}{\sum m} = \frac{1}{M} \quad (5.3)$$

(W/m² °C), jossa M on kokonaislämmönvastus

$$M = m_s + m_u + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_n}{\lambda_n} \dots \quad (5.4),$$

jossa m_s ja m_u ovat rakennusosan sisä- ja ulkopintojen lämpövastukset, m_s on 0,17 kun lämpö siirtyy ylöspäin ja m_u 0,04 kun lämpö siirtyy alaspäin (maanvaraisissa rakenteissa m_u 0). d_1 , d_2 , d_n ovat eri ainekerrosten paksuudet. λ_1 , λ_2 ja λ_n ovat eri ainekerrosten lämmönjohtavuudet. Lämpötilan muutos yhdessä ainekerroksessa x , jonka lämmönvastus on m_x

$$\Delta t_x = \frac{m_x}{\sum m} (t_s - t_u) \quad (5.5)$$

missä t_s ja t_u ovat koko rakenteen eri puolilla olevat lämpötilat.

Rakenteen eri puolilla oleva lämpötilaero tasaantuu rakenteessa sen eri osien lämmönvastusten suhteessa.

Vesihöyrynpitoisuus ja diffuusion määrä

Kyllästyskosteus (eli se vesimäärä, joka ilmassa voi tiivistymättä olla tietyssä lämpötilassa) riippuu vain lämpötilasta siten, että mitä korkeampi lämpötila sitä suurempi on myös kyllästyskosteus.

Kyllästyskosteus lämpötilassa t lasketaan likiarvokaavalla:

$$v_k = 10^{-3} \left[4,85 + 3,47 \left(\frac{t}{10} \right) + 0,945 \left(\frac{t}{10} \right)^2 + 0,158 \left(\frac{t}{10} \right)^3 + 0,0281 \left(\frac{t}{10} \right)^4 \right] \quad (5.6)$$

Kaava pätee lämpötila-alueella $-20 \dots +80$ °C

Tästä saadaan edelleen laskettua kyllästyspaine kaavalla:

$$p_k = v_k \cdot 461,4(273 + t) \quad (5.7)$$

Materiaalin vesihöyrynvastus Z_p : $Z_p = \frac{d}{d_p}$, (5.8)

missä d on materiaalin paksuus ja d_p vesihöyrynläpäisevyys.

Rakenteen eri puolien välinen osapaine -ero tasaantuu rakenteessa sen eri osien vesihöyrynvastuksien suhteessa.

Vesihöyryn osapaineen muutos yhdessä ainekerroksessa n , jonka vesihöyrynvastus on Z_{pn}

$$\Delta P = \frac{Z_{pn}}{\sum Z_p} (p_s - p_u) \quad (5.9)$$

missä p_s ja p_u ovat koko rakenteen eri puolilla olevat osapaineet ja $\sum Z_p$ rakenteen eri osien vesihöyrynvastusten summa. Suhteellisella kosteudella RH tarkoitetaan ilmassa olevan kosteuserän suhdetta kyllästyskosteuteen tai ilman osapaineen suhdetta kyllästyspaineeseen.

Vesihöyrypitoisuuksien (tai osapaineiden) ero rakenteen eri puolilla aikaansaa diffuusion.

$$\text{Diffuusion määrä } g = \frac{p_s - p_u}{\sum Z_p} \quad (5.10)$$

5.2.2 Laskelmissa käytetyt materiaaliarvot

Laskelmissa on käytetyt materiaaliarvot (taulukko 5.7) ovat tyypillisiä kirjallisuudessa ja materiaalivalmistajien antamia materiaaliominaisuuksien keskiarvoja.

Taulukko 5.7 Laskelmissa käytetyt materiaaliarvot.

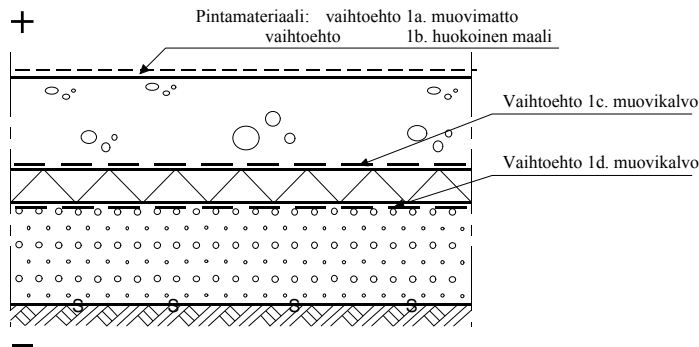
Materiaali	Lämmönjohtavuus λ (W/m °C)	Vesihöyrynläpäisevyys δ_p ($\times 10^{-12}$ kg/m s Pa)	Vesihöyrynvastus $Z_p = d/\delta_p$ ($\times 10^9$ m ² ms Pa/kg)
Betoni	1,5	2,0	
Lämmöneriste polystyreeni	0,041	1,2	
Lämmöneriste mineraalivilla	0,050	85	
Puu	0,14	1,0	
Parketti tai pontti- laudoitus	0,14	1,0	
Muovikalvo, 0,2 mm			450
Bitumisively			500
Muovimatto (PVC)			80
Akryylilatem- maali			4
Salaojitussora /Sandberg 1987/	1,8	30	

5.2.3 Laskemissa käytetyt rakenteet

Laskemissa käytettiin erilaisia alapohjarakenteita, joista osa on olemassa olevien ohjeiden (RT-kortit) mukaisia ja osa sellaisia, joita on yleisesti käytetty viime vuosina ja vuosikymmeninä (esim. kaksoislaatta). Käytetyt rakenteet ovat seuraavat:

Rakenne 1: Lämpöeristetty maanvarainen alapohja, eriste laatan alla

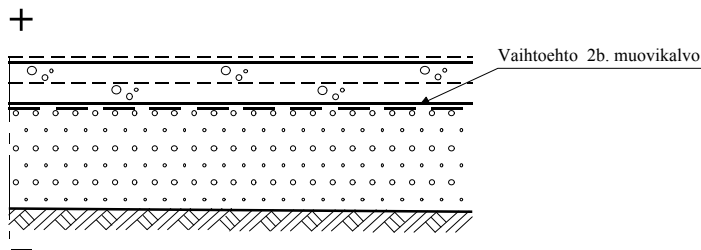
RAKENNE 1



- Pintamateriaali vaihtoehto 1a. - muovimatto
- vaihtoehto 1b. - huokoinen maali
- betonilaatta 100 mm
- vaihtoehto 1c. muovikalvo
- lämmöneriste, polystyreeni 100 mm
- vaihtoehto 1d. muovikalvo
- salaojasora 200 mm

Rakenne 2: Lämpöeristämätön maanvarainen alapohja

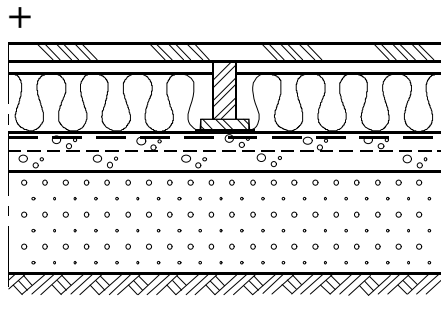
RAKENNE 2 (RT AP 204)



- Pintamateriaali muovimatto
- betoni 100 mm
- vaihtoehto 2b. muovikalvo
- salaojasora 200 mm

Rakenne 3: Lämpöeristetty maanvarainen alapohja, eriste laatan päällä

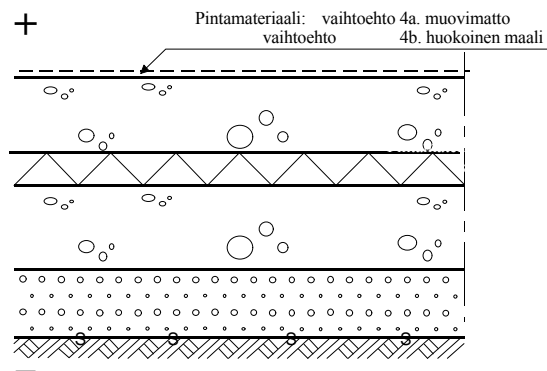
RAKENNE 3



- Ponttilaudoitus
- koolaus + lämmöneriste 100 mm
- mineraalivilla
- höyrinsulku, 0,2 mm muovi
- betoni 100 mm
- salaojasora 200 mm

Rakenne 4: kaksoislaatta

RAKENNE 4



Pintamateriaali vaihtoehto 4a.

muovimatto

vaihtoehto 4b.

huokoinen maali

betoni 80 mm

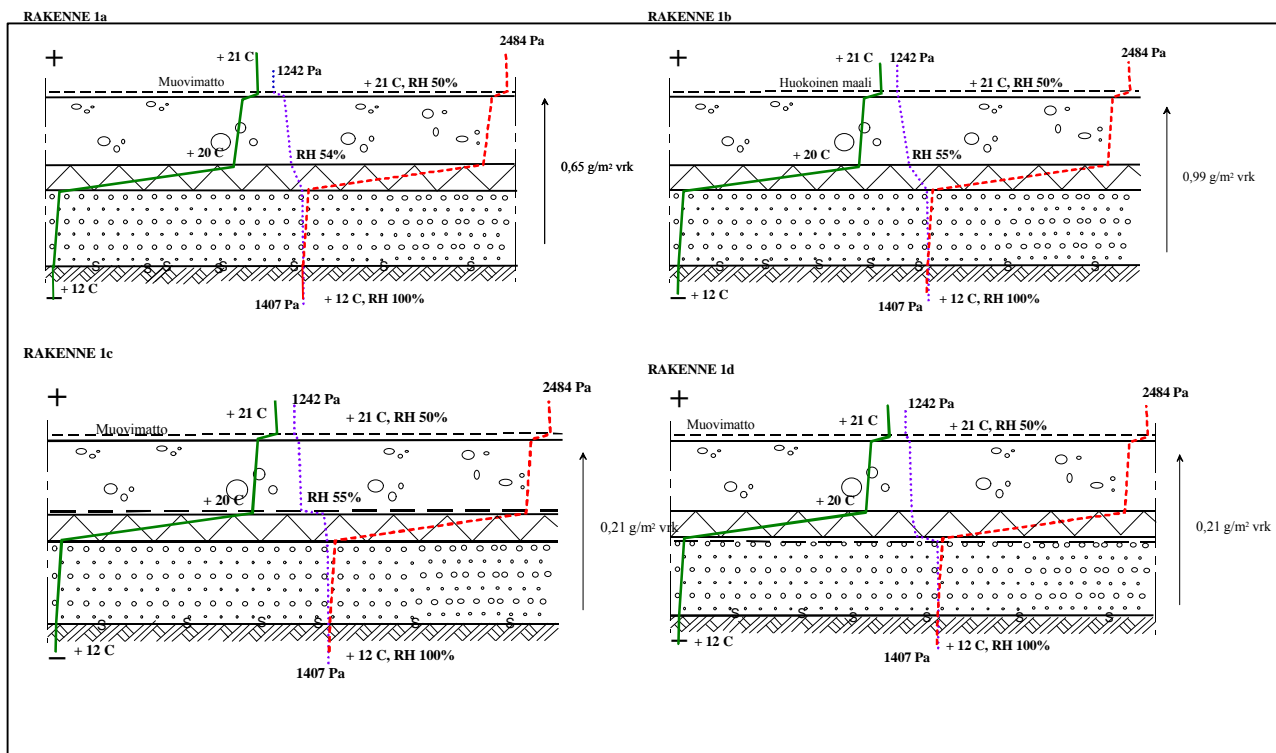
lämmöneriste, polystyreeni 100 mm

betoni 100 mm

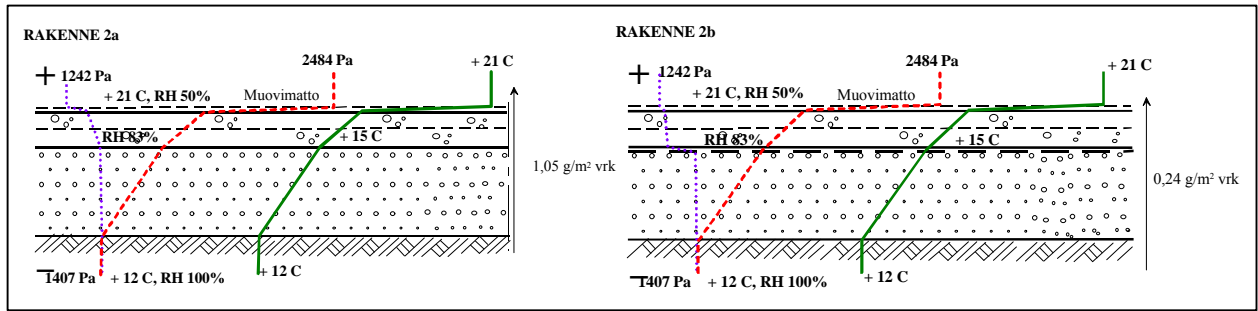
salaojasora 200 mm

5.2.4 Tulokset ja niiden tarkastelu

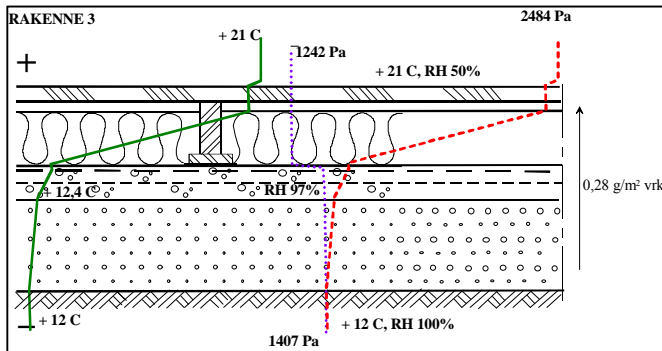
Laskelmissa määriteltiin rakenteille lämpötila-, kyllästyspaine- ja osapainekäyrät sekä laskettiin diffuusion määrä. Sisätilan ja maan lämpötiloina käytettiin sisällä +21 °C:tta ja maassa +12 °C:tta. Maassa käytetty lämpötila on se, joka numeerisella mallinnuksella saatiin maan keskimääräiseksi lämpötilaksi 15 vuoden lämpökuormituksen jälkeen. Eri rakenteille saadut lämpötila-, kyllästyspaine- ja osapainekäyrät on esitetty kuvissa 5.25 ... 5.28. Ehjä käyrä on lämpötilakäyrä, katkoviiva on kyllästyspainekäyrä ja pisteviiva osapainekäyrä.



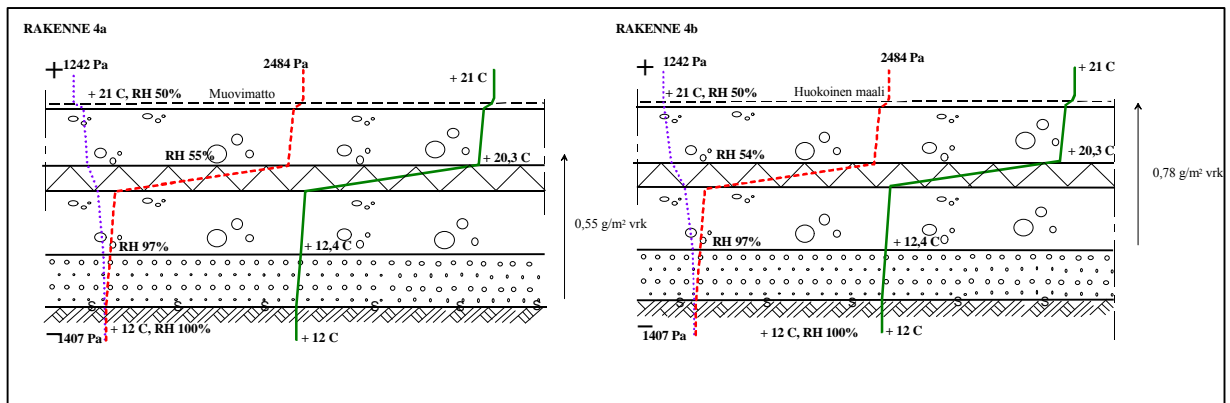
Kuva 5.25 Rakenteen 1 kyllästyspaine- ja osapainekäyrät, maanpohjan lämpötila +12 °C.



Kuva 5.26 Rakenteen 2 kyllästyspaine- ja osapainekäyrät, maanpohjan lämpötila +12 °C.



Kuva 5.27 Rakenteen 3 kyllästyspaine- ja osapainekäyrät, maanpohjan lämpötila +12 °C.



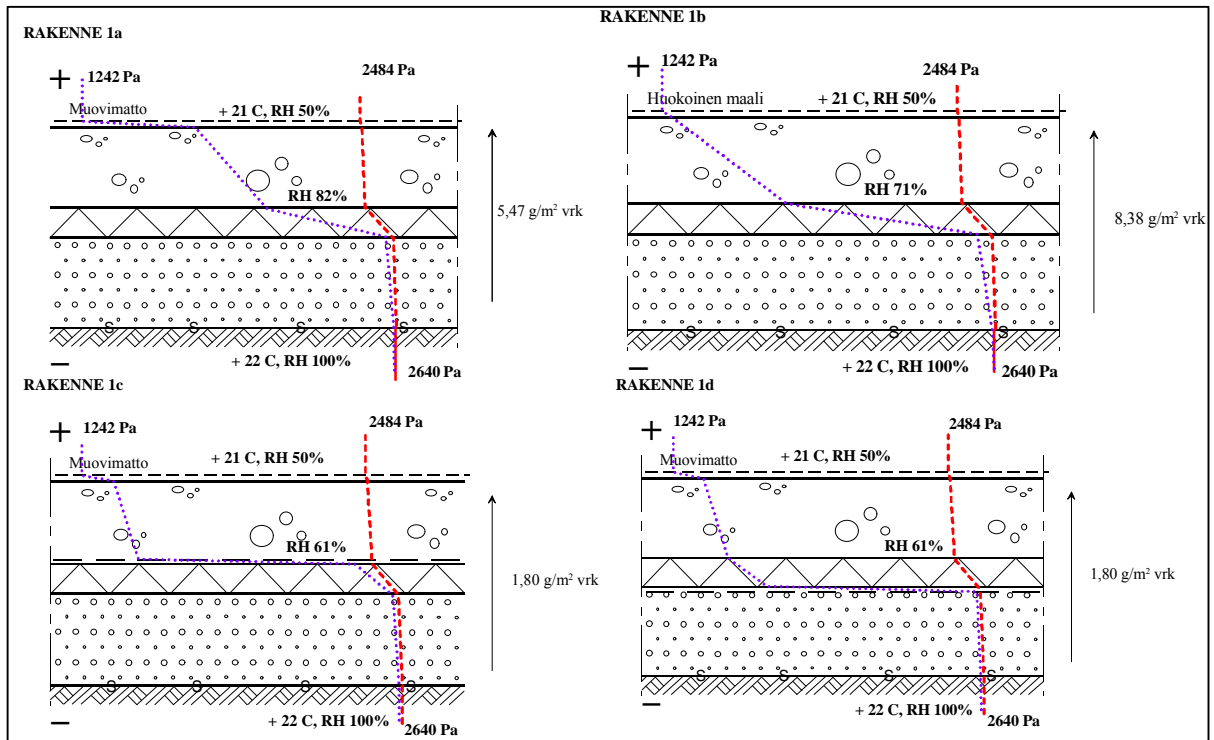
Kuva 5.28 Rakenteen 4 kyllästyspaine- ja osapainekäyrät, maanpohjan lämpötila +12 °C.

Taulukossa 5.8 esitetään laskennallinen diffuusion määrä eri alapohjarakenteilla. Diffuusion suunta muuttuu alapohjarakenteessa ylöspäin kun maan lämpötila nousee n. 10 °C:seen (olettaen sisälämpötilaksi 21 °C ja RH 50% ja maahan RH 100%) riippumatta alapohjarakenteesta, koska se riippuu rakenteen eri puolilla olevista lämpötiloista ja RH:sta, ei rakenteen vesihöyrynvastuksesta.

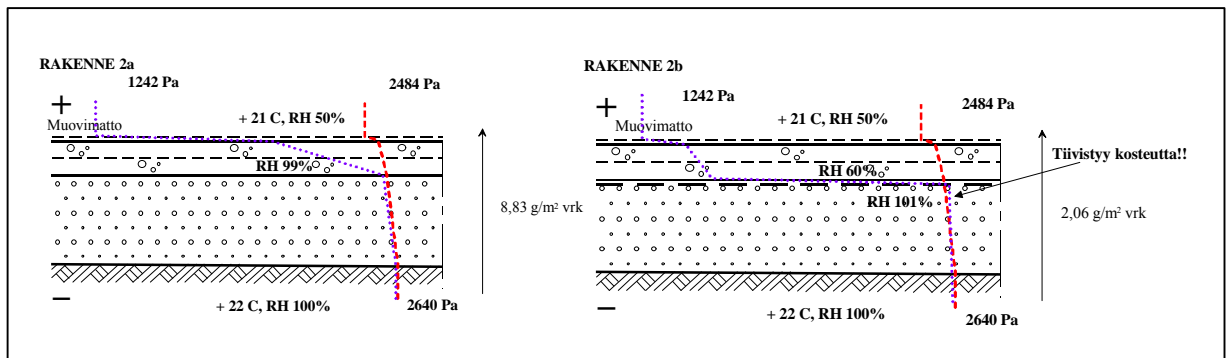
Kuvista 5.25 ... 5.28 voidaan todeta, että kaikki tarkastellut alapohjarakenteet toimivat moitteettomasti laskennassa käytetyillä lämpötila - ja kosteus - sekä materiaaliarvoilla. Ongelmia rakenteen toimivuuteen voi aiheutua jos maapohjan lämpötila kohoaa erittäin paljon. Muutettaessa maapohjan lämpötilaa, rakenteiden toiminta muuttuu olennaisesti. Kuvissa 5.29 ... 5.32 on esitetty rakenteiden kyllästyspaine - ja osapainekäyrät kun maapohjan lämpötila on + 22°C.

Taulukko 5.8 Eri alapohjarakenteissa tapahtuva diffuusion määrä kun maapohja rakennuksen alla on +12 °C:ttä.

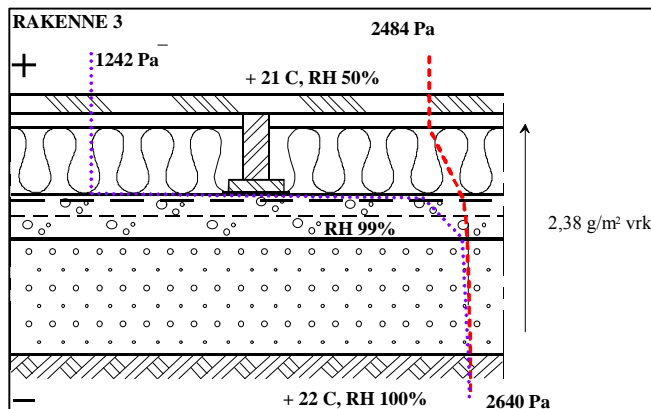
Rakenne	Diffuusion määrä [g/ m ² vrk]	Diffuusion suunta
1a. Lämpöeristetty maanvarainen laatta, eriste laatan alla, muovimatto	0,650	Ylös ↑
1b. Lämpöeristetty maanvarainen laatta, eriste laatan alla, huokoinen maali	0,990	Ylös ↑
1c. Lämpöeristetty maanvarainen laatta, eriste laatan alla, muovikalvo eristein päällä, muovimatto	0,213	Ylös ↑
1d. Lämpöeristetty maanvarainen laatta, eriste laatan alla, muovikalvo eristein alla, muovimatto	0,213	Ylös ↑
2a. Lämpöeristämätön maanvarainen laatta, muovimatto	1,047	Ylös ↑
2b. Lämpöeristämätön maanvarainen laatta, muovikalvo betonin alla, muovimatto	0,244	Ylös ↑
3. Lämpöeristetty maanvarainen laatta, eriste laatan päällä, puulattia	0,279	Ylös ↑
4a. Kaksoislaatta, muovimatto	0,550	Ylös ↑
4b. Kaksoislaatta, huokoinen maali	0,778	Ylös ↑



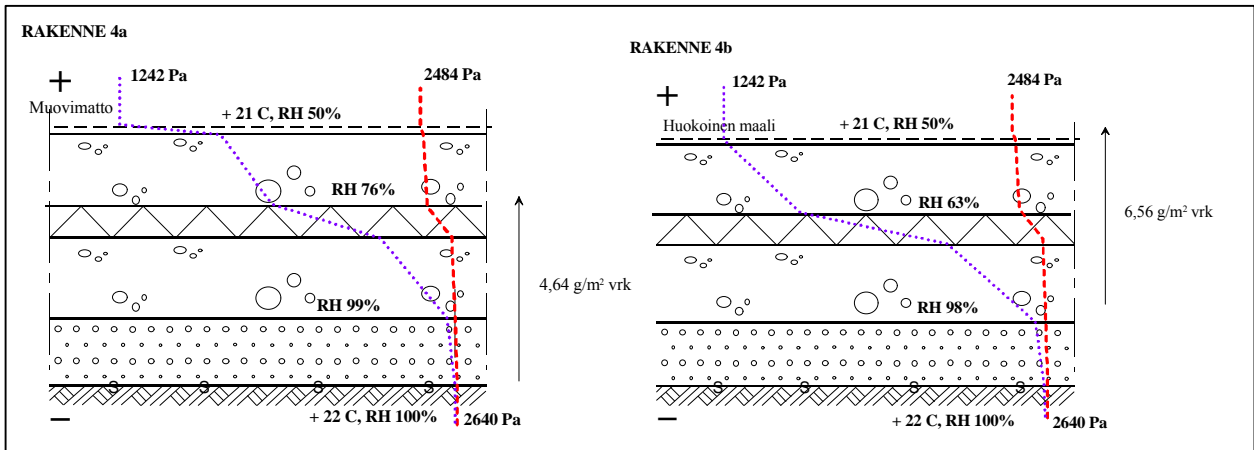
Kuva 5.29 Rakenteen 1 kyllästyspaine- ja osapainekäyrät, maanpohjan lämpötila +22 °C.



Kuva 5.30 Rakenteen 2 kyllästyspaine- ja osapainekäyrät, maanpohjan lämpötila +22 °C.



Kuva 5.31 Rakenteen 3 kyllästyspaine- ja osapainekäyrät, maanpohjan lämpötila +22 °C.



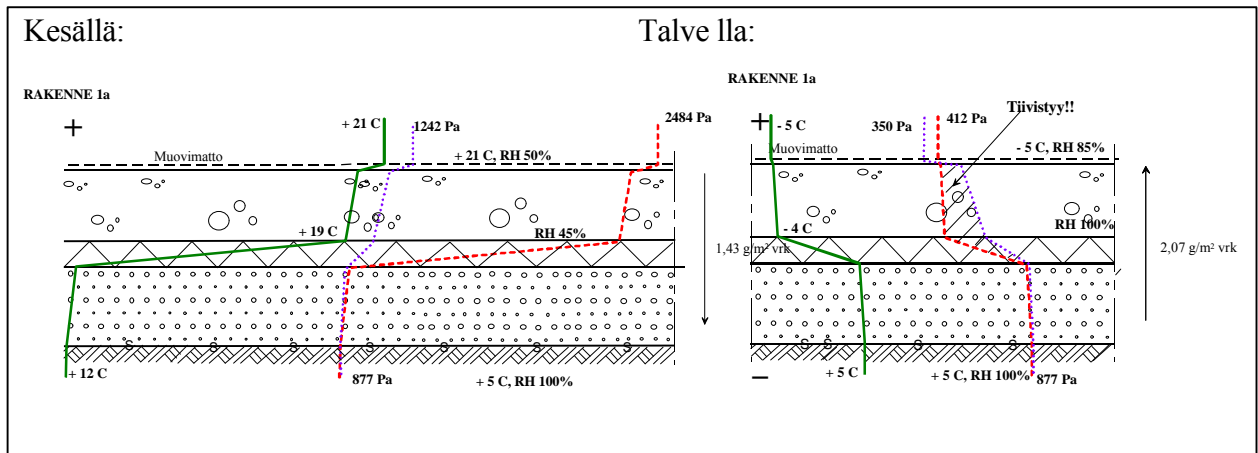
Kuva 5.32 Rakenteen 4 kyllästyspaine- ja osapainekäyrät, maanpohjan lämpötila +22 °C.

Maapohjan lämpötilan kasvaessa riski, että rakenteeseen tiivistyy kosteutta kasvaa. Varioimalla maapohjan lämpötilaa saadaan määriteltyä tarkastelluille rakenteille kriittinen lämpötila, jossa rakenteeseen alkaa tiivistyä kosteutta. Kriittiset r ajatilälämpötilat eri rakenteissa tapahtuvalle tiivistymiselle ovat seuraavat:

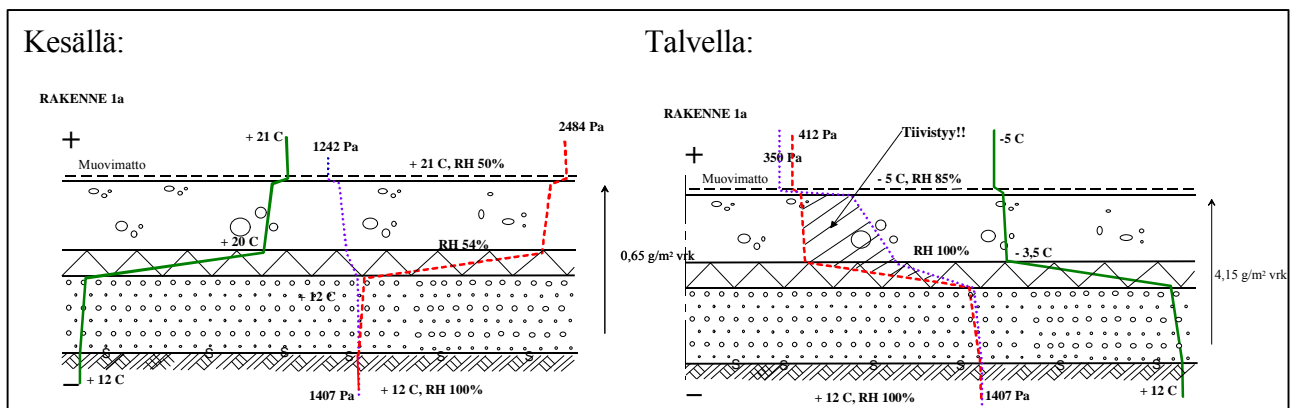
- 1a. n. 27 °C
- 1b. n. 33 °C
- 1c. n. 23 °C
- 1d. n. 24 °C
- 2a. n. 23 °C
- 2b. n. 22 °C
- 3. n. 24 °C
- 4a. n. 29 °C
- 4b. n. 34 °C

Vastaavasti lämpötilan noustessa kasvaa riski, että rakenteen yksittäisen materiaalikerroksen kriittinen kosteuspitoisuus ylittyy (esim. pinnoite, liimat, puurakenne).

Diffuusion kannalta mielenkiintoista on myös tarkastella sellaisen rakennuksen alapohjarakenteen lämpötila- ja kosteuskäyttäytymistä, jonka sisälämpötila vaihtelee vuodenajoittain, esimerkiksi kesämökki, joka pidetään talvella lämmittämättömänä. Tällaisessa tapauksessa alapohjarakenne tuskin ehtii saavuttaa lämpötila - ja kosteustasapainoan eri vuodenaikoina, mutta eri vuodenaikojen ääriarvot voidaan laskea stationääritilan peruskaavoilla. Tarkastelussa on rakenteena käytetty alapohjarakennetta 1a (laatan alapuolelta lämpöeristetty betonilaatta, muovimatto). Olettaessa, että maapohjan lämpötila pysyy +5 °C:ssa (RH 100%) ja sisätilan lämpötila ja suhteellinen kosteus vaihtelee kesän +21 °C:sta ja RH 50%:sta talven -5 °C:seen ja RH 85% (samat kuin ulko-olosuhteet), saadaan kuvan 5.33 mukaiset kyllästyspaine- ja osapainekäyrät. Vastaavasti jos maapohjan lämpötilaksi oletetaan +12 °C:ta ja muut olosuhteet kuten edellä, saadaan kuvan 5.34 mukaiset kyllästyspaine- ja osapainekäyrät.



Kuva 5.33 Kesämökin alapohjarakenteen kosteuskäyttäytyminen, maapohjan lämpötila +5 °C.



Kuva 5.34 Kesämökin alapohjarakenteen kosteuskäyttäytyminen, maapohjan lämpötila +12 °C.

Kuvista 5.33 ja 5.34 voidaan todeta, että osan vuodesta lämmittämättömänä olevan rakennuksen alapohjassa on kosteuden tiivistymisen vaara.

5.2.5 Johtopäätökset

Kriittinen maapohjan lämpötila, jossa alapohjassa tapahtuvan diffuusion suunta muuttuu rakenteesta riippumatta alhaalta ylöspäin suuntautuvaksi on hieman yli +10 °C:tta, kun oletetaan, että maassa suhteellinen kosteus RH=100% ja rakennuksen sisällä suhteellinen kosteus RH=50% ja lämpötila 21 °C. Luvun 5.2 numeeristen mallinnusten mukaan tämä lämpötila saavutetaan maanvaraisessa alapohjassa jo parin vuoden kuluttua rakentamisesta, vaikka alapohjalaatan alla on tavanomainen lämmöneriste. Rakenteen toimivuuden kannalta tämä lämpötila ei ole kuitenkaan ole kriittinen, rakenteet yleensä toimivat moitteettomasti kyseisessä lämpötilassa. Lämpötilan noustessa riski kosteuden tiivistymiselle tai yksittäisen materiaalin kriittisen kosteuspitoisuuden ylittymiselle kasvaa. Yleensä alapohjan alla olevan maan tulee lämmitä yli +20 °C:seen, jotta rakenteessa on vesihöyryn tiivistymisen riski. Tällainen maapohjan lämpeneminen on mahdollista jos laatasta ei ole lainkaan lämmöneristystä tai pinta-alaltaan laajojen rakennusten alapohjissa, joissa ei käytetä keskialueella lämmöneristystä tai laatan alla maassa kulkee lämpöputkia.

Ruotsalaisten tutkimusten mukaan /Harderup, 1993/ diffuusion kannalta alapohjarakenne toimii, jos betonilaatan alla kauttaaltaan on lämmöneriste, jonka lämmönvastus on sellainen, että eristeen eri puolien välille muodostuu likimäärin 3 °C lämpötilaero. Kauttaaltaan asennettu lämmöneriste vähentää rakenteen alla olevan maapohjan lämpenemistä ja betonilaatan alapuolelle asennettuna betonilaatta on rakenteen 'lämpimällä puolella' ja siten kuivempi.

USA:ssa on annettu raja -arvoja lattiarakenteessa tapahtuvalle kosteusvirralle eri lattiapinnoitemateriaaleja käytettäessä. Kumi -, vinyyli- ja puulattiapinnoite toimii moitteettomasti jos kosteusvirta laatussa on enintään 15 g/m² vrk /Day, 1996/. Vinyylilattialle voidaan sallia enintään 24,7 g/m² vrk kosteusvirta. Yksinkertainen testausmenetelmä kosteusvirran määrittämiseen on myös kehitetty /Day, 1996/. 'Kosteus -kupoli-testissä' (Moisture Dome Test) lattialle asetetaan kalsium -kloridia (suola aikaansaa noin 32,3 %:n suhteellisen kosteuden) sisältävä astia, jonka paino tiedetään. Suola -astian päälle asetetaan astia alaspäin, jonka reunat suljetaan tiiviisti lattiapintaan. Suola -astiaan lattiarakenteesta tiivistyvää kosteutta mitataan punnitsemalla ja tästä saadaan määriteltyä kosteusvirta pinta -alaa ja vuorokautta kohti. Menetelmän etuna, että mittauslaitteisto on yksinkertainen ja testausta varten ei tarvita rikkoo lattiarakennetta.

5.3 Empiirisesti mitattuja alapohjarakenteiden lämpötiloja ja kosteuksia

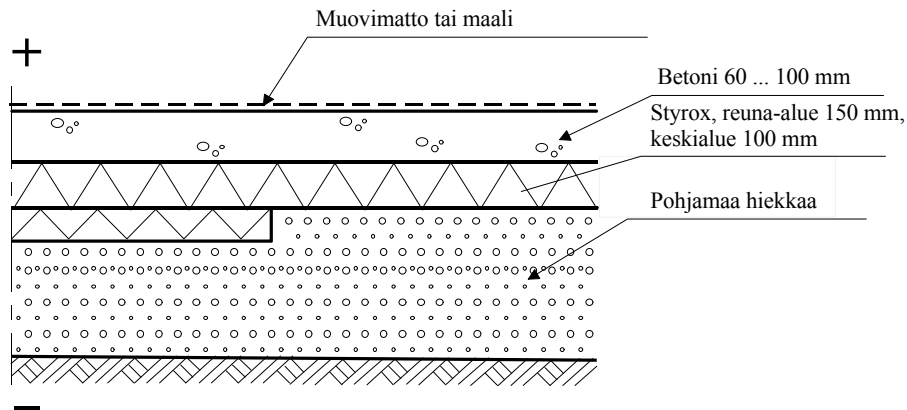
Talonrakennustekniikan laboratoriossa on viimeisten lähes 10 vuoden aikana tutkittu lukuisia kosteusongelmaisia rakennuksia. Rakennuksille on tehty kosteustekninen kuntotutkimus, joka on kohdistunut kaikkiin rakennusosiin tai ongelmallisiin rakennusosiin. Seuraavassa esitellään joukko Case -tapauksia, joissa on tutkittu maanvaraisen alapohjarakenteen toimivuutta mittaamalla rakenteen lämpötilaa ja kosteuspitoisuutta. Suurimmassa osassa rakenteita on ollut jonkinasteisia vaurioita. Seuraavassa ei paneuduta ongelmiin ja niiden ratkaisuun vaan esitellään lyhyesti millaisia lämpötila - ja kosteustuloksia mittauksissa on saatu, jotta edellä esitettyjä mallinnuksia ja laskelmia voidaan verifioida.

5.3.1 CASE 1: Terveysaseman vuodeosaston laajennusosa

Taustaa

Rakennus on 10 vuotta vanha, rakennettu harjanteen laelle, pohjavesi syvällä. Ensimmäisen käyttövuoden aikana ollut noin 20 kertaa viemäriverkoston tukkeutumia, jolloin useaan otteeseen on noussut viemäriverettä lattialle. Havaittu kosteus - ja homeongelmia maanvaraisen lattian keskiosalla, josta syystä tilat käyttökiellossa.

CASE 1



Kuva 5.35 Case 1: terveysaseman vuodeosaston laajennusosa. Alapohjan rakenneleikkaus.

Maanvaraisen laatan rakenne: betonilaatta 100 mm (60 ... 100 mm), reuna -alueella 150 mm lämmöneristys styroksia ja keskialueella 100 mm, pohjamaa hiekkää. Lattian pintamateriaalina muovimatto tai maali (kuva 5.35).

Mittaukset

Rakenteesta on mitattu terästangon sisällä olevalla termolangalla lämpötilat 10 mittauspisteestä kolmelta eri syvyydeltä (100 mm, 500 mm ja 1000 mm lattiapinnan tasosta). Lisäksi 100 mm syvyydeltä laatan alapinnasta on mitattu Vaisalan kosteusmittarilla suhteelliset kosteudet. Osassa mittauspisteistä laatan pintamateriaali oli poistettu aiemmin (laatta päässyt kuivumaan).

Syvyys 100 mm: lämpötila: 15,0 ... 22,1 °C, RH: 52,2 ... 84,7%

Syvyys 500 mm: lämpötila: 13,5 ... 19,8 °C

Syvyys 1000 mm: lämpötila: 12,9 ... 19,9 °C

Rakenteesta otetuista betoni- ja hiekkänäytteistä on määritetty kosteuspitoisuudet paino-%:na.

Betoni: kosteuspitoisuus: 1,9 ... 3,4 %, joista suuremmat pitoisuudet keskialueella

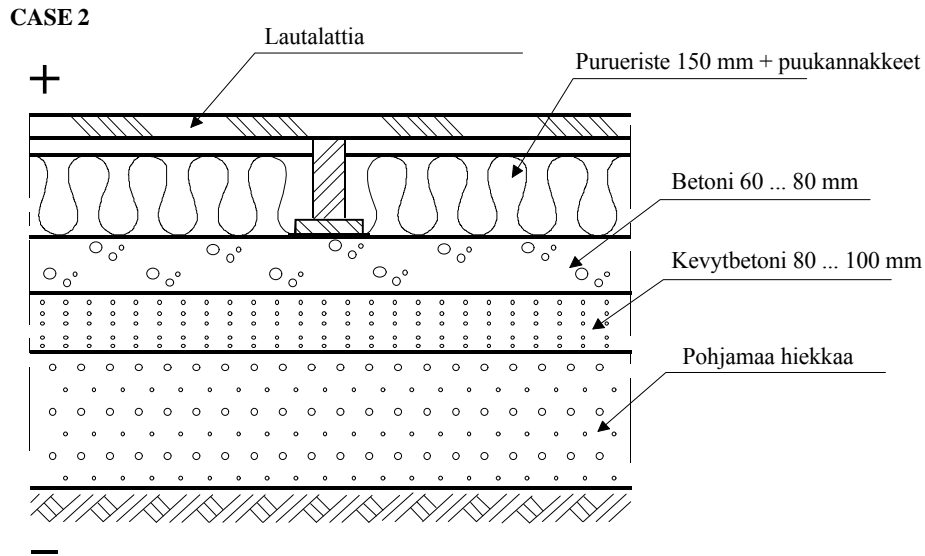
Hiekka: kosteuspitoisuus, pinnassa (lämmöneristeen alla): 1,0 ... 2,5 %

Pohjalla (500 ... 600 mm): 1,1 ... 4,3%

5.3.2 CASE 2: Koulun alapohja/ liikuntasali

Taustaa

Rakenne: laualattia, puukannakkeet + purueriste 150 mm, betonilaatta 60... 80 mm, kevytbetoni 80 ... 100 mm, hiekka (kuva 5.36).



Kuva 5.36 CASE 2: Liikuntasalin alapohja. Rakenneleikkaus.

Mittaukset

Rakenteesta on mitattu yhteen sä 12 mittauspisteestä eri syvyyksiltä (150 ... 2000 mm) lämpötilat ja lisäksi viidessä mittauspisteessä on mitattu 150 mm syvyydeltä suhteellinen kosteus. Alhaisimmat lämpötilalukemat on saatu mittauspisteistä, jotka ovat rajoittuneet tilaan, joka on ollut lämmittämättömänä koko lämmityskauden.

Syvyys 150 ... 200 mm: lämpötila: 12,3 ... 21,8 °C, RH: 55,0 ... 86,8 %

Syvyys 650 ... 1000 mm: lämpötila: 12,7 ... 21,7 °C

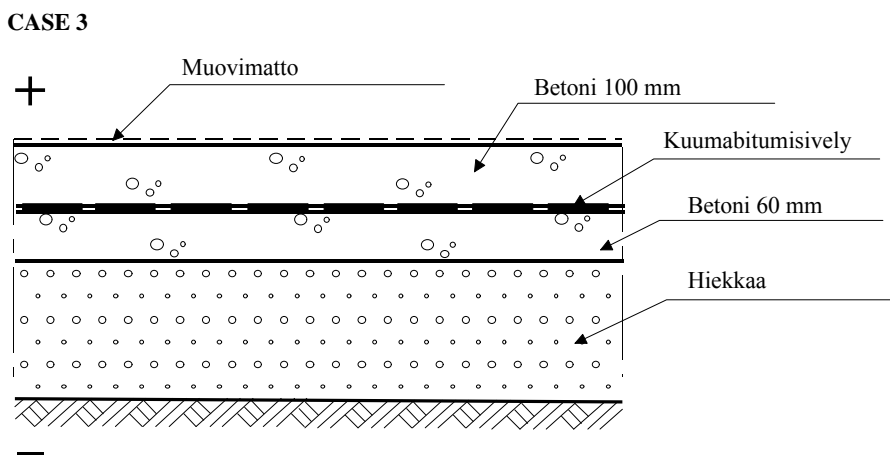
Syvyys 1250 ... 2000 mm: lämpötila: 13,5 ... 19,0 °C

Hiekkakerroksen yläosasta otetun näytteen kosteuspuitoisuus on ollut 2,8 paino-% ja betonilaatasta otetun näytteen kosteuspuitoisuus 0,4 paino-%.

5.3.3 CASE 3: Koulukeskus

Taustaa

Rakennuskompleksi, joka muodostuu kolmesta 1951, 1954 ja 1961 rakennetusta rakennuksesta. Maapohjassa paksuna kerroksena kapillaarista saven/hiesua ja rakennuspaikalla hyvin vetisiä kohtia.



Kuva 5.37 CASE 3: Koulukeskus. Alapohjan rakenneleikkaus.

Mittaukset

Eri rakennuksista on mitattu alapohjarakenteista lämpötiloja. Rakennuksissa on tehty useita mittauksia vuosina 1996 ja 1997.

Rakennus 1 (1954 rakennettu): rakenne: muovimatto, 100 mm betonilaatta, kuumabitumisively, 60 mm betonilaatta, hiekkaa (kuva 5.37).

Lämpötila n. 1 m syvyydessä: 15,6 °C ... 17,7 °C

Rakennus 3 (1961 rakennettu):

lämpötila laatan alapinnassa 15,7 ... 19,3 °C

lämpötila n. 1 m syvyydessä ja pohjavedenpinnan taso: 12,9 °C /ei mitattu

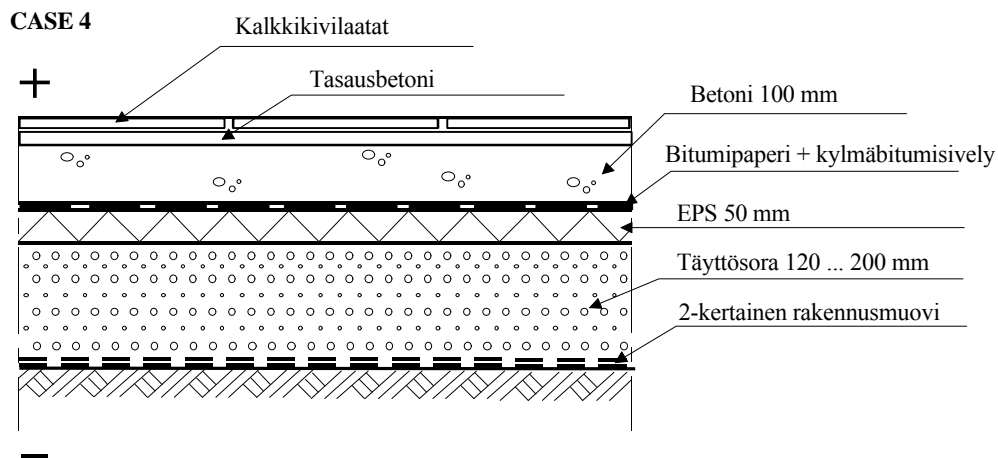
13,7 °C /pvp. 600 mm

18,5 °C/ei hav. pvp.

5.3.4 CASE 4: Museon kellaritilojen lattiat

Taustaa

Museon maanalaiset kellaritilat ovat 1980 -luvulta. Laatoissa havaittu värimuutoksia. Rakenne: kalkkikivilaatta, tasauslaasti, 100 mm betonilaatta, bitumipaperi+ kylmäbitumisively, lämmöneriste 50 mm EPS, soratäyttö 120 ... 200 mm, 2 -kertainen rakennusmuovi, tasaussora, pohjamaa (kuva 5.38).



Kuva 5.38 CASE 4: Museon kellaritilojen lattiat. Alapohjan rakenneleikkaus.

Mittaukset

Rakenteesta on mitattu 3:sta tutkimuskohdasta betonilaatan yläosan lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä 0,9 ... 1,3 m syvyydeltä maapohjan lämpötila. Vastaavista kohdista on tehty pohjavedenpinnan seurantamittaukset.

Betonilaatta: lämpötila: 19,7 ... 19,8 °C, RH: 67 ... 84,3 %

Maa: lämpötila: 12,6 ... 16,0 °C, korkein lämpötila mitattu kohdasta, jossa pvp alhaalla

Pohjavedenpinta: 400 ... 1000 mm lattiatasosta, kausittainen tason vaihtelu vähäistä.

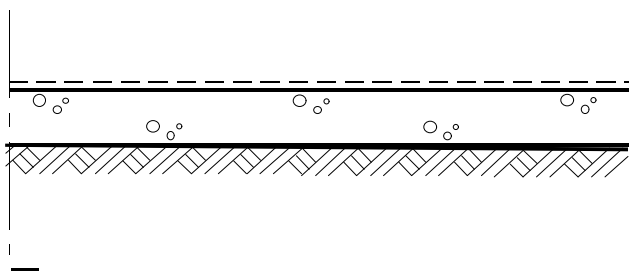
5.3.5 CASE 5: Koulun maanvarainen alapohja

Taustaa

Yli 20 vuotta vanha, 2 vuotta sitten saneerattu huomattavan suuri (60 x 100 m) koulurakennus. Tuolloin osaa rakennusta korotettiin, jolloin osa lattiapinnoista oli saderasitukselle alttiina useita kuukausia. Rakennuspaikasta johtuen (soraharju) maanvaraisista lattioista puuttuu kapillaarisen nousun katkaiseva sorastus, lämmöneristeet ja salaojitus (kuva 5.39). Pian remontin jälkeen lattiapinnoitteet alkoivat vaurioitua.

CASE 5

+



Kuva 5.39 CASE 5: Koulun maanvarainen alapohja. Rakenneleikkaus.

Mittaukset

Yhteensä 9:stä mittauspisteestä mitattiin maapohjan lämpötila. Lisäksi on avauskuopista otettu 7 maalajinäytettä silmämää räisästi kolmesta eri tyyppisestä hiekkakerroksesta. Näistä näytteistä on määritelty kosteuspitoisuudet (paino-%).

Maapohja, 900 ... 1100 mm syvyys: lämpötila: 18,6 ... 22,5 °C

Maapohja, 1500 ... 2000 mm syvyys: lämpötila: 15,4 ... 21,5 °C

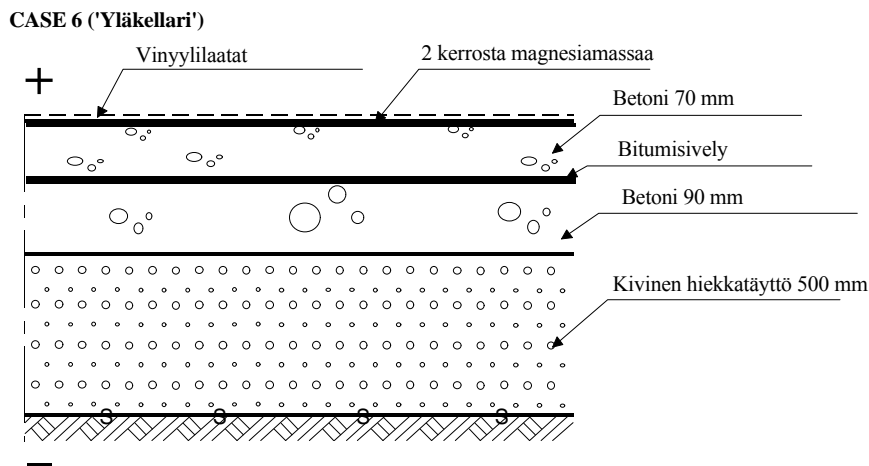
Hiekkakerros: kosteuspitoisuus: 1,7 ... 3,0 %

Pohjamaa: kosteuspitoisuus: 1,5 ... 5,3%, näytteenotto-syvyydet 400 ... 1300 mm

5.3.6 CASE 6: Koulurakennuksen kellaritilojen lattiat

Taustaa

Rakennuksen osittain maanpinnan tasolla ja osittain alapuolella olevan 'yläkellarin' lattiarakenne: vinyylilaatta, 2 kerrosta magnesiamaassaa, 70 mm betonilaatta, bitumisively, 90 mm betonilaatta, n. 500 mm kivinen hiekkatäyttö, kova pohjamaa (moreenia?). Lähes kokonaan n. 2 m. maanpinnan alapuolella olevan 'alakellarin' lattiarakenne: maali, 2 turvonnutta magnesiamaassakerrosta, 100 mm betonilaatta, bitumisively, 60 mm betonilaatta, hienorakenteinen täyttö/pohjamaa (kuva 5.40).



Kuva 5.40 CASE 6: Koulurakennuksen kellaritilojen lattiat. Rakenneleikkaus.

Mittaukset

'Yläkellarin' hiekkatäytöstä on määritetty kosteuspitoisuus ja kapillaarimetrillä kapillaarinen nousukorkeus. Pohjamaasta on lisäksi mitattu n. 700 mm syvyydeltä lämpötila.

Hiekkatäyttö: kosteuspitoisuus: 5,88 ... 6,11 paino-%,
kapillaarinen nousukorkeus: 0,19 ... 0,20 m

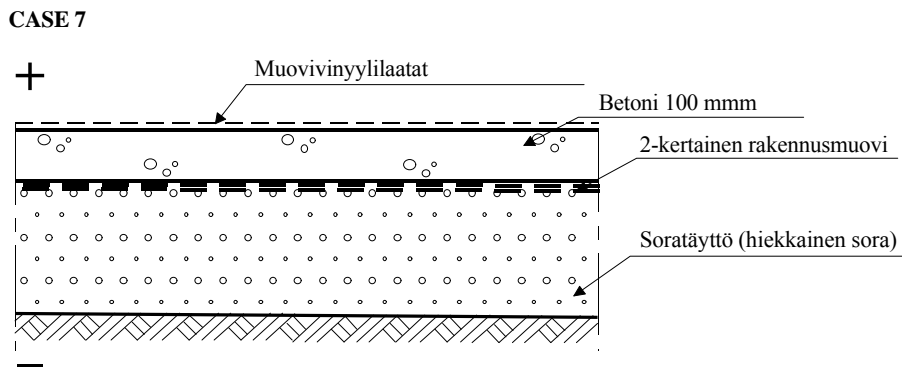
Pohjamaa, 700 mm syvyys: lämpötila: 19,2 ... 19,8 °C

'Alakellarin' täytön kosteuspitoisuus oli 5,95 paino-% ja kapillaarimetrillä määritetty kapillaarinen nousukorkeus 0,71 m. Maan lämpötilaksi on mitattu 800 mm syvyydeltä 17,6 °C ja 1400 mm syvyydeltä 17,1 °C.

5.3.7 CASE 7: Market-rakennuksen maanvarainen laatta

Taustaa

Marketin maanvaraisen betonilaatan pintarakenteet on uusittu n. vuosi sitten. Lattiarakenne: muovilaatat, 100 mm betonilaatta, 2-kert. muovi, sorainen hiekkatäyttö (kuva 5.41).



Kuva 5.41 CASE 7: Market rakennuksen maanvarainen laatta. Rakenneleikkaus.

Mittaukset

Sisäilman suhteellinen kosteus on ollut alhainen, 20 ... 30%. Alustäytöstä on määritelty kosteuspitoisuus ja maasta n. 1100 mm syvyyteen asti on mitattu lämpötila. Lisäksi sekä betonilaatan että välittömästi laatan alla olevan soran huokosilman suhteellista kosteutta on mitattu Vaisalan mitta-anturilla. Sorakerroksen suhteellinen kosteus oli ollut mittausalueen ulkopuolella, yli 100%, betonilaatan suhteellinen kosteus oli ollut yli 90%.

Täyttömaa, n. 100 mm syvyydeltä:	kosteuspitoisuus: 2,0 ... 3,4 paino-%.
Maa, 200 mm syvyys:	lämpötila: 20,3 ... 21,2 °C
Maa, 400 mm syvyys:	lämpötila: 19,2 ... 20,8 °C
Maa, 600 mm syvyys:	lämpötila: 19,6 ... 20,6 °C
Maa, 800 mm syvyys:	lämpötila: 20,2 ... 20,5 °C
Maa, 1100 mm syvyys:	lämpötila: 20,2 ... 21,1 °C

5.3.8 Yhteenveto

Taulukkoon 5.9 on koottu yhteenveto edellä kuvatuista tapauksista ja niissä mitatuista lämpötiloista. Kaikissa tapauksissa rakenteesta on mitattu lämpötila, joissakin myös kosteuspitoisuus joko Vaisalan kosteusmittarilla tai kuivatus-punnitus-menetelmällä.

Taulukko 5.9 Yhteenvedo kosteusvaurio-ongelmallisista rakennuksista mitatuista maapohjan lämpötilajakaumista.

Alapohjarakenne, ylhäältä lukien	Mittausyvyys mm	Mitattu lämpötila °C
Muovimatto tai maali, betonilaatta 100 mm, lämmöneriste styrox 150/100 mm	100 mm	15,0 ... 22,1 °C
	500 mm	13,5 ... 19,8 °C
	1000 mm	12,9 ... 19,9 °C
Lautalattia, purueriste+puukannakkeet 150 mm, betonilaatta 60 ... 80 mm, kevytbetoni 80 ... 100 mm	150 ... 200 mm	12,3 ... 21,8 °C
	650 ... 1000 mm	12,7 ... 21,7 °C
	1250 ... 2000 mm	13,5 ... 19,0 °C
Muovimatto, betonilaatta 100 mm, bitumisively, betonilaatta 60 mm	1000 mm	15,6 ... 17,7 °C
Kalkkivililaatat, betonilaatta 100 mm, bitumipaperi+bitumisively, lämmöneriste EPS 50 mm, soratäyttö 120 ... 200 mm, 2-kert. rakennusmuovi	900 ... 1300	12,6 ... 16,0 °C
Betonilaatta 150 mm	900 ... 1100 mm	18,6 ... 22,5 °C
	1500 ... 2000	15,4 ... 21,5 °C
Muovilaatat, 2-kert. magnesiassa, betonilaatta 70 mm, bitumisively, betonilaatta 90 mm Maali, 2-kert. magnesiassa, betonilaatta 100 mm, bitumisively, betonilaatta 60 mm	700 mm	19,2 ... 19,8 °C
	800 mm	17,6 °C
	1400 mm	17,1 °C
Muovilaatat, betonilaatta 100 mm, 2-kert. muovi	200 ... 600 mm	19,2 ... 21,2 °C
	800 ... 1100 mm	20,2 ... 21,1 °C

Edellä esitetyistä kosteusongelmallisissa rakennuksissa mitatuista maapohjan lämpötilamittauksista voidaan havaita, että kaikissa rakennuksissa maanvaraisen alapohjan alla oleva maa on lämmennyt, osassa jopa huomattavan paljon. Nämä havainnot tukevat luvussa 5.2 esitettyjä numeerisia mallinnuksia, kaikissa kohteissa maapohjan lämpötila on ollut vähintään 12 °C. Luvun 5.3 stationääritilan diffuusiolaskelmien pohjalta voidaan vastaavasti havaita, että useissa edellä kuvatuissa tapauksissa maapohjan lämpötila on kohonnut niin paljon, että alapohjarakenteessa ylöspäin suuntautuva vesihöyryn diffuusio voi aiheuttaa yksittäisten materiaalikerrosten kriittisen kosteuspuiteisuuden ylittymisen tai kosteuden tiivistymistä rakenteeseen, mikä onkin ollut näissä tapauksissa todennäköisin kosteusongelmien syy tai osasy. Tarkastellut rakennukset ovat iältään 10 ... 50 vuoteen. Useissa rakennuksissa oli tehty alapohjarakenteen pinnoitemateriaalin muutostöitä ja vaihdettu tiiviimpi pinnoite, jonka jälkeen ongelmia oli ilmennyt.

Mikäli edellä luvussa 5 esitetty maanvaraisen alapohjan merkittävä lämpeneminen ja siitä johtuva vesihöyryn diffuusio maasta alapohjarakenteeseen on ilmeistä, maanvaraisten alapohjarakenteiden suunnitteluun ja pintamateriaalien valintaan sekä uudisrakentamisessa että korjaamisessa tulee kiinnittää erityistä huomiota. Kuitenkin pidemmälle viettäviä johtopäätöksiä varten tarvitaan laajoja seurantamittauksia erilaisista ja eri -ikäisistä maanvaraisista alapohjista. Maanvaraisen betonilaatan rakennekosteuden oletetaan kuivuvan alaspäin rakennusajan jälkeen. Seurantamittauksia tarvitaan myös siitä, kuinka nopeasti maapohja lämpenee ja diffuusion suunta muuttuu ylöspäin ja ehtiikö betoni- ja maanvaraisen rakennekosteus kuivua.

6 Laboratoriokoeohjelma

Laboratoriokokeilla selvitettiin eri maalajien hygroskooppista tasapainokosteutta, kapillaarista kosteuden etenemänopeutta pysty- ja vaakasuuntaan, sekä kehitettiin ja testattiin alapohjarakenteiden lämpötila- ja kosteusolosuhteiden kenttämittauslaitteita ja -menetelmiä. Laboratoriokokeiden tuloksena saatiin hygroskooppisia tasapainokosteuskäyriä eri maalajeille eri lämpötiloissa (+ 5 °C, + 20 °C), kapillaarisia tasapainokosteuskäyriä pysty- ja vaakasuuntaan eri maalajeille, sekä kapillaarisia nousu- ja etenemänopeuksia pysty- ja vaakasuunnassa.

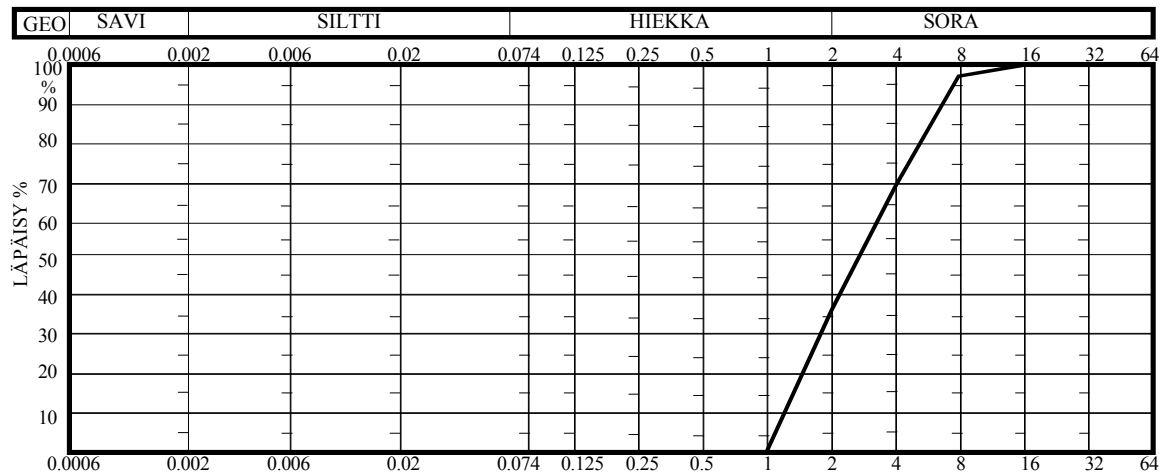
6.1 Tutkittavat täyttö- ja salaojitusmateriaalit

Kokeissa tutkitut maalajit olivat luonnonkiviaineisia yleisiä salaojatoria, hiekkoja ja moreeneja.

Salaojatorat:

Ohjealueen I salaojatora

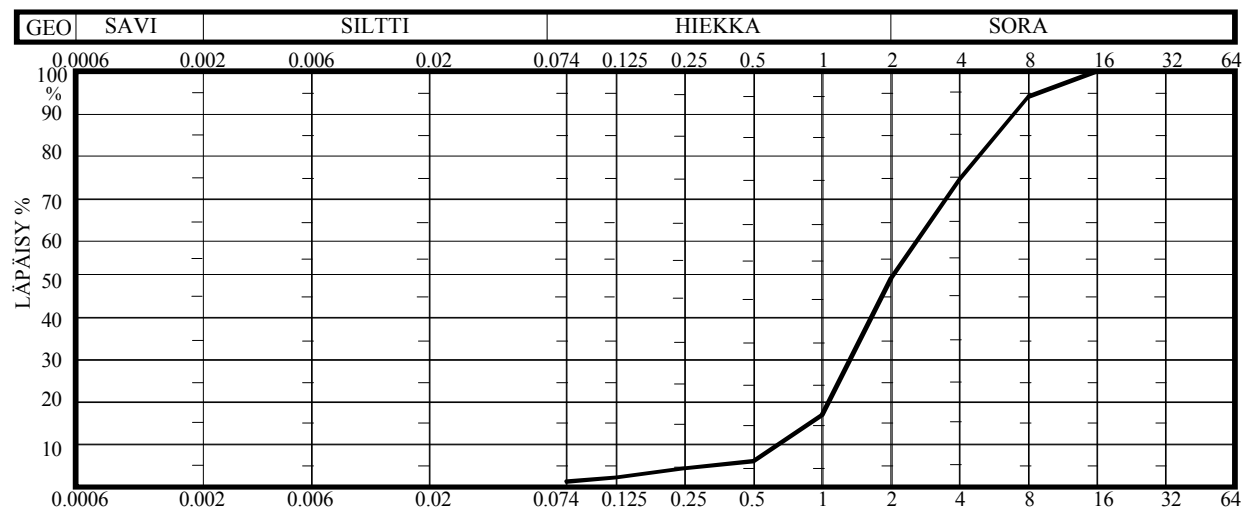
Ohjealueen I salaojatoran rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.1. Ohjealueen I salaojatora saatiin pesuseulomalla laboratoriossa ohjealueen II salaojatorasta pois < 1 mm rakeet. Saatu materiaali on siis erittäin hyvää ohjealueen I salaojatoraa, jonka hienoainespitoisuus on 0 %.



Kuva 6.1 Ohjealueen I salaojatoran rakeisuuskäyrä

Ohjealueen II salaojasora

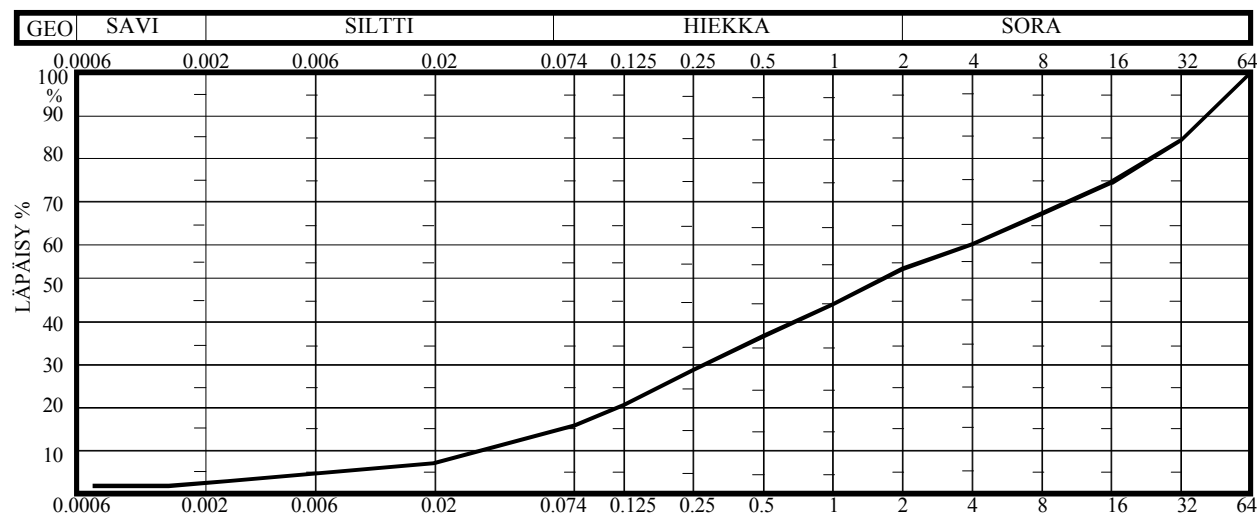
Ohjealueen II salaojasoran rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.2.



Kuva 6.2 Ohjealueen II salaojasoran rakeisuuskäyrä.

Moreenit:*Hiekkamoreeni*

Kuvassa 6.3 on esitetty tutkitun hiekkamoreenin rakeisuuskäyrä. Moreenin Proctor –kokeella määritetty maksimikuivatilavuuspaino $\gamma_{\text{dmax}} = 21.85 \text{ kN/m}^3$ ja optimivesipitoisuus $w_{\text{opt}} = 5.7 \%$.

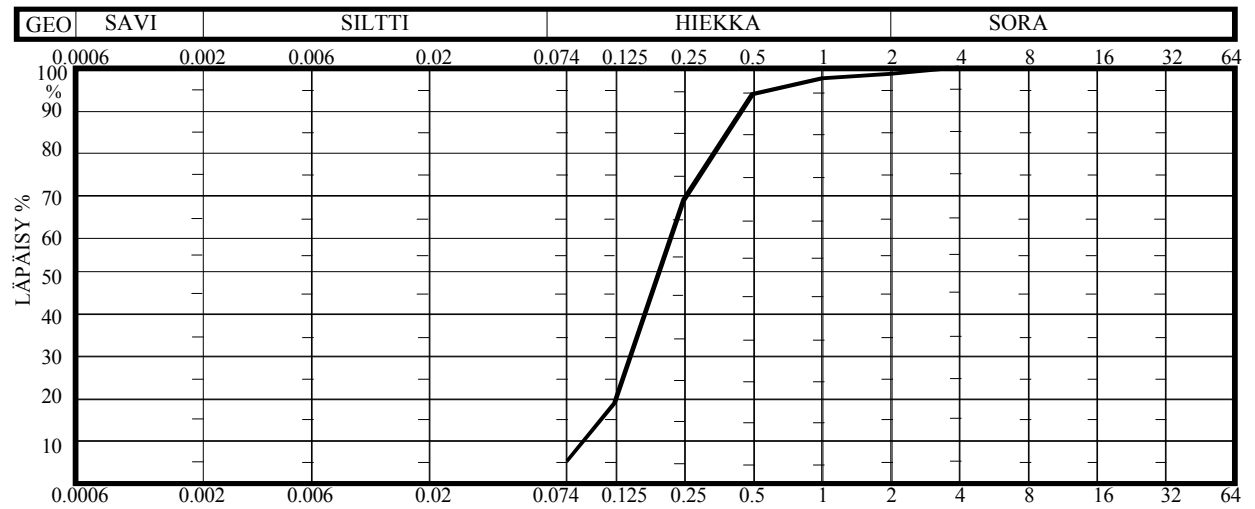


Kuva 6.3 Hiekkamoreenin rakeisuuskäyrä.

Hiekat:

Filleri

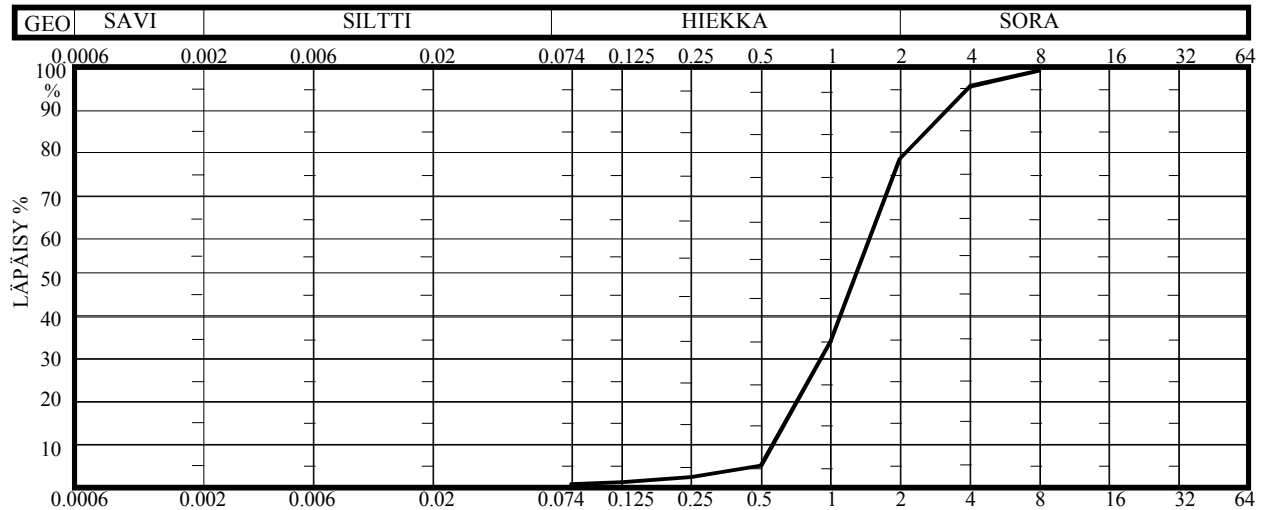
Kokeissa käytetyn fillerin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.4. Fillerin optimivesipitoisuus suoritettuna Proctor-kokeen mukaan oli $w_{opt} = 15,3 \%$ ja kuivatilavuuspaino $\gamma_d = 16,78 \text{ kN/m}^3$.



Kuva 6.4 Fillerin rakeisuuskäyrä.

Karkea hiekka

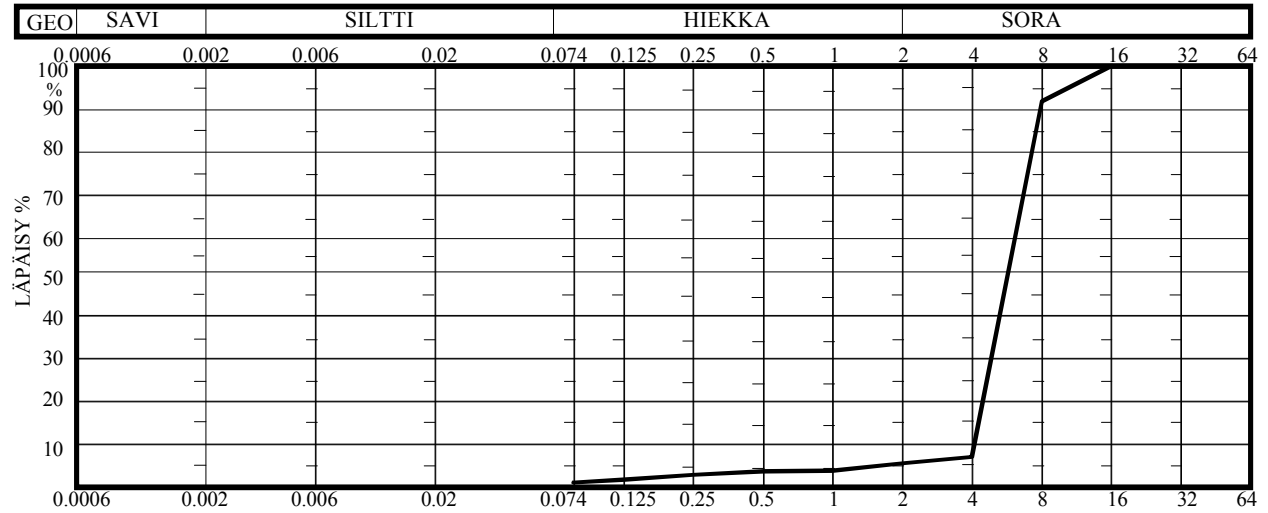
Kokeissa käytetyn karkean hiekan rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.5 Karkean hiekan rakeisuuskäyrä.

Sorat:*Sepeli*

Kokeissa käytetyn sepelin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.6.



Kuva 6.6 *Sepelin rakeisuuskäyrä.*

6.2 Hygroskooppinen tasapainokosteus

6.2.1 Yleistä hygroskooppisen tasapainokosteuden määrittämisestä

Kuten teoriaosuudessa luvussa 3 on esitetty materiaalin saavuttaessa kosteustasapainonsa ympäristön kanssa, vesi sitoutuu erilaisilla sitoutumismekanismeilla riippuen ympäristön kosteudesta. Alhaisissa ilman suhteellisissa kosteuksissa sitoutuminen tapahtuu vesimolekyylien adsorptiolla ja korkeammissa kosteuksissa yhä enenevässä määrin myös kapillaarikondenssilla. Suhteellisen kosteuden raja -arvo, jossa kapillaarikondenssi alkaa riippuu materiaalin huokoskoosta, mitä pienempiä huokokset ovat sitä alhaisemmassa RH:ssa kapillaarikondenssi alkaa. Yleensä rajana pidetään n. 98%:n suhteellista kosteutta. Käytännössä tämä on samalla myös raja, jota suurempia suhteellisen kosteuden arvoja on vaikea saada aikaan normaalioloissa.

Tunnetuin, tarkin ja yksinkertaisin menetelmä määrittellä materiaalin hygroskooppinen tasapainokosteus on punnitusmenetelmä. Materiaalia säilytetään halutussa ilman suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa (yleensä +20 °C) kunnes materiaali on saavuttanut tasapainon ympäristönsä kanssa, jonka jälkeen materiaalin vesipitoisuus määritetään punnitsemalla. Materiaalin kosteuspitoisuus voidaan antaa kg vettä/tilavuus, tai %/kuivapaino.

6.2.2 Hygroskooppisen tasapainokosteuden määrittäminen

Hygroskooppinen tasapainokosteus määriteltiin kaikille maalajityypeille kahdessa eri lämpötilassa, $t_1 = +5\text{ °C}$ ja $t_2 = +20\text{ °C}$, kolmen näytteen sarjoilla. Näyte -erät kuivattiin tuuletetussa kuivausuunissa n. vuorokauden ajan. Kuiva näyte sullottiin verkkorakenteisiin astioihin haluttuun tiiviyteen, n. 90 ... 95% (kuva 6.7). Astioina käytettiin halkaisijaltaan 100 mm ja korkeudeltaan 100 mm ruostumattomasta teräsverkosta valmistettuja purkkeja. Näytteet asetettiin suljettuun muovi säiliöön, jonka ilman suhteellinen kosteus on saatu lähes 0%:iin silikageelin avulla. Samalla niiden lämpötila tasaantui. Näytteitä pidettiin siinä kunnes niiden paino ei enää muuttunut. Kuiva näyte punnittiin elektronivaa'alla 0,1 g tarkkuudella ja asetettiin suljettuun muovisäiliöön, jonka ilman suhteellinen kosteus oli säädetty suolojen avulla halutulle tasolle (kuva 6.7). Säiliön tehokas ilman kierto oli varmistettu prosessorin tuulettimella. Näytteen huokosten ilman suhteellisen kosteustason annettiin tasaantua säiliön ilmankosteutta vastaavalle tasolle. Punnituksia jatkettiin, kunnes näytteen paino ei enää muuttunut ja näyte oli saavuttanut tasapainokosteuden säiliössä vallitsevissa olosuhteissa. Näytteen painon muutoksesta saatiin näytteeseen hygroskooppisesti tiivistyneen veden määrä säiliössä vallitsevassa lämpötilassa ja kosteustasossa.



Kuva 6.7 Hygroskooppisen tasapainokosteuden määrittämisessä käytetty tiivis muovisäiliö, jonka ilmankosteutta on säädelty suolojen avulla sekä sullottu maanäyte.

Tasapainokosteuden saavuttamisen jälkeen näyte siirrettiin uuteen säiliöön, jonka kosteustaso oli suolojen avulla pidetty edellistä korkeampana. Näytteen saavutettua kosteustasapainon uusissa olosuhteissa se punnittiin ja siirrettiin uuteen säiliöön, jonka ilmankosteus oli edellistä säiliötä suurempi. Näin jatkettiin kunnes oli saavutettu haluttu RH - taso (lähes 100%). Näin saatiin määritelty hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä materiaalin kastuessa eli absorptiokäyrä.

Lisäksi määriteltiin joitakin tasapainokosteuden arvoja materiaalien kuivuesssa eli desorptiokäyrältä. Näytteet upotettiin veteen ja annettiin olla upoksissa kunnes lähes kaikki huokokset olivat vedellä kyllästyneitä. Tämän jälkeen näytteet asetettiin kuten edellä tiettyyn suhteelliseen kosteuteen, jossa niiden annettiin tasaantua. Näytteiden hitaan tasaantumisaajan vuoksi, näytteille määriteltiin tasapainokosteudet vain kahdessa suhteellisen kosteuden arvossa, RH 75% ja RH 97%.

Säiliöiden suhteelliset ilmankosteudet ja käytetyt suolat olivat taulukon 6.1 mukaiset.

Taulukko 6.1 Kokeissa käytetyt suolat ja niillä saavutettavat suhteelliset ilmakosteudet /NT, 1988/.

Suhteellinen ilmakosteus RH (%) +20°C:ssa	Suhteellinen ilmakosteus RH (%) +5°C:ssa	Käytetty suola
0	0	Silikageeli
33,1 ± 0,2	33,6 ± 0,3	Magnesiumkloridi, MgCl ₂ · 6H ₂ O
54,4 ± 0,2	58,9 ± 0,4	Magnesiumnitraatti, Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O
75,5 ± 0,1	75,7 ± 0,3	Natriumkloridi, NaCl *
85,1 ± 0,3	87,7 ± 0,4	Kaliumkloridi, KCl
97,6 ± 0,5	98,5 ± 0,9	Kaliumsulfaatti, K ₂ SO ₄
* Suolaa käytetty vain desorptiotasapainokosteuksien määrittämisessä		

Suoloilla saavutettava näytesäiliöiden suhteellinen kosteus ja lämpötila mitattiin jokaisella punnituskerralla Vaisalan lämpötila - ja RH -anturilla (HMP 44L), jonka mittaustarkkuus lämpötilalle on ± 0,4°C ja suhteelliselle kosteudelle ± 2%RH.

Absorptiokokeet eli tasapainokosteudet materiaalien kastuessa tehtiin kullekin materiaalille kolmen näytteen sarjana kahdeksassa lämpötilassa (+ 5 °C, + 20 °C). Desorptiokokeet eli tasapainokosteudet materiaalin kuivuessa tehtiin kullekin materiaalille yhdellä näytteellä ja + 20 °C lämpötilassa.

6.3 Kapillaarisen nousukorkeuden määrittäminen

6.3.1 Yleistä kapillaarisen nousukorkeuden määrittämisestä

Perinteisesti materiaalin kapillaarinen nousukorkeus on määritelty asettamalla tutkittavalla materiaalilla täytetty läpinäkyvä putki vesilähteeseen ja mittaamalla nousukorkeus silmämääräisesti. Näin on saatu lähinnä alempi kapillaarinen nousukorkeus (kts. luku 3).

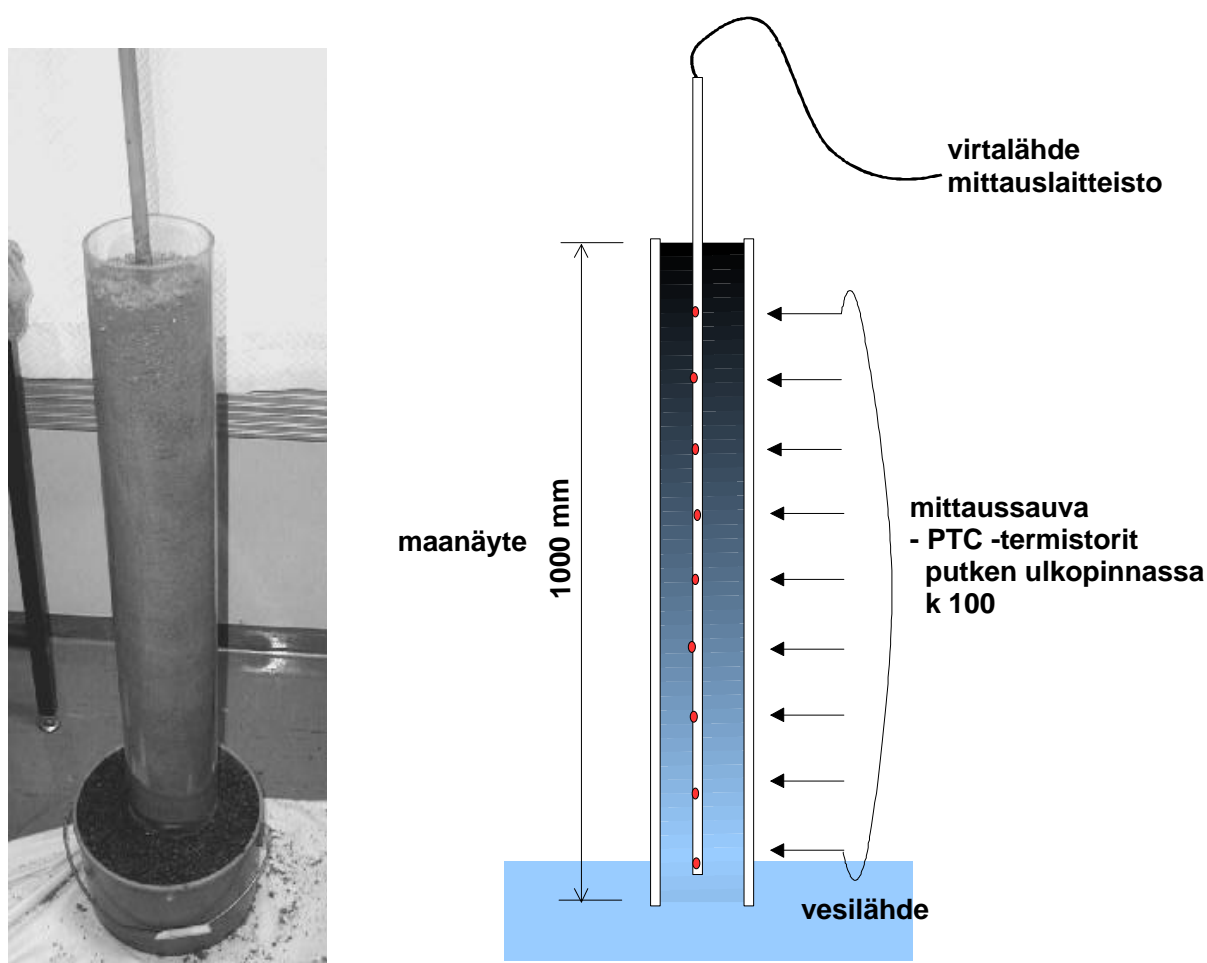
Laboratorio-olosuhteissa hienorakeisten maalajien kapillaarisuus voidaan määrittellä kapillaarimetrillä. Kapillaarimetrissä vedellä täysin kyllästetyn näytteen alapuolelle muodostetaan ilmapumpulla alipaine. Koska maanäytteen yläpuolella vallitsee normaali ilmanpaine ja alapuolella keinotekoisesti aikaansaatu alipaine, ulkopuolinen ilma pyrkii paine-eron takia murtautumaan kapillaarista vettä sisältävän näytteen läpi. Alipainetta kasvattamalla saadaan syntymään tilanne, missä kapillaarinen vesi ei enää pysty vastustamaan ilman tunkeutumista näytteen läpi. Paine-ero vesipatsaaksi muunnettuna vastaa kapillaarista imukykyä ja on siten sama kuin kapillaarinen nousukorkeus tutkittavassa materiaalissa. Kapillaarimetri ei sovellu karkearakeisten maalajien kapillaarisuuden määrittämiseen.

Karkearakeisten maalajien mekaanisten ja fysikaalisten testausmenetelmien eurooppalaista standardia ollaan parhaillaan kehittämässä. Standardiluonnoksen osassa 10 /CEN, 1996/ esitetään karkearakeisen maan veden imukorkeuden määrittämismenetelmä. Menetelmä on tarkoitettu yli 4 mm rakeisten maalajien kapillaarisen nousukorkeuden määrittämiseen. Kuiva putkeen (halkaisija vähintään 5* maksimiraekoko) sullottu materiaali asetetaan alapäästään

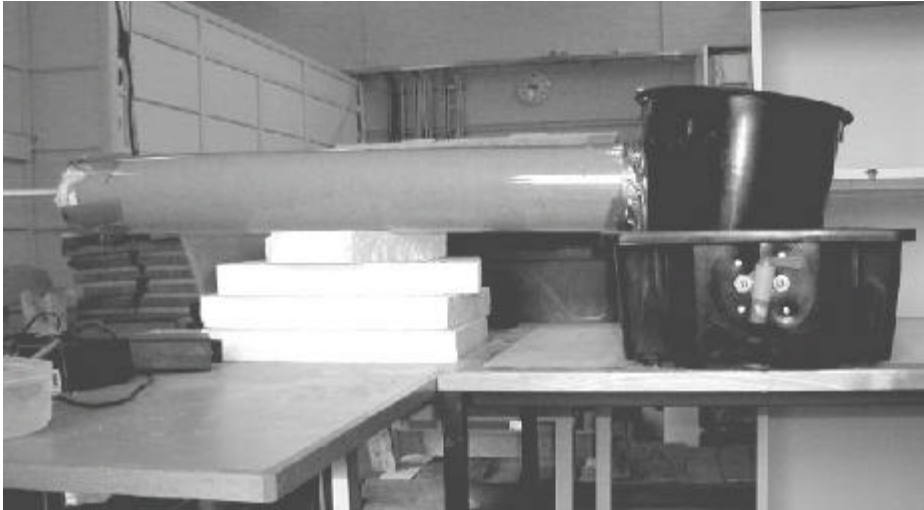
vesikontaktiin (tislattu v esi), putken yläpää on suljettu muovipussilla. Materiaalin kapillaarisesti imemän veden määrää mitataan punnitsemalla näyte 5min, 1 päivän, 2 päivän, 3 päivän, 7 päivän ja siitä edelleen viikon välein vähintään 5 viikon ajan. Tästä määritellään tietyssä ajassa materiaalin kapillaarisesti imeytyneen veden määrä. Sen jälkeen putkesta otetaan eripaksuisia materiaalinäytteitä riippuen raekoosta ja putken halkaisijasta, joille määritetään paino. Näin saadaan vesimäärät (paino -%:a kuivapainosta) eri korkeuksilla vedenpinnasta.

6.3.2 Kapillaarisuuden määrittäminen pysty- ja vaakasuunnassa

Kapillaarista nousunopeutta tutkittiin kappaleessa 7 esitettyjen mittausputkien avulla asettamalla kuiva sullottu näyte vesilähteeseen kuvan 6.8 mukaisesti.



Kuva 6.8 Kapillaarisen nousunopeuden ja -korkeuden määrittämlaitteisto ja koejärjestely.



Kuva 6.9 Vaakasuuntaisen kapillaarinopeuden määrittämisen koejärjestely.

Kapillaarisen nousun annettiin tapahtua vapaasta vedenpinnasta putken alapinnasta materiaaliin, jossa antureilla 100 mm välein mitattiin materiaalin lämmönjohtavuutta ja samalla sen vesipitoisuutta. Lämmönjohtavuuden muutosten perusteella voitiin seurata maamassan kostumista ja kapillaarisen nousun nopeutta materiaalissa. Kokeella määritettiin materiaalissa tapahtuvan kapillaarisen nousun nopeutta sekä materiaalin kosteuspitoisuuden muutoksia vapaan veden pinnan ja kapillaarisen nousukorkeuden välillä, eli materiaalin kapillaarikäyrä. Kapillaarikäyrä voidaan antaa vesipitoisuutena w tai kyllästysasteena S suhteessa kapillaariseen nousukorkeuteen. Materiaaleista otettiin myös eri korkeuksilta vertailunäytteitä, joista määritettiin vesipitoisuus punnitsemalla.

Vastaavasti määriteltiin kapillaarinen laskukäyrä, jossa alapäästään vedessä olevaan putkeen valutettiin putken yläpäästä vettä, kunnes maa oli kyllästynyt. Veden annettiin vapaasti valua putkesta, jonka jälkeen mitattiin antureilla maan vesipitoisuus.

Koe suoritettiin alun perin kuivalle näytteelle, jolloin saatiin kapillaarikäyrät ja kapillaarinen nousunopeus ja -korkeus kuivalle materiaalille.

Kapillaarista nousua vastaava koe suoritettiin vaakasuuntaiselle kapillaarisuudelle 1 metrin pituisella maanäytteellä, jonka toiseen päähän syötettiin tasainen painovoimainen virtaus (kuva 6.9). Saman kaltaisilla koejärjestelyillä kuin aikaisemminkin mitattiin antureiden avulla kosteuden etenemisnopeutta näytteenessä ja kosteuspitoisuuden muutoksen tasaannuttua määritettiin näytteen kosteuspitoisuus 10 cm välein kosteuslähteestä lukien. Tuloksena saatiin vaakasuuntainen kapillaarinen etenemäkäyrä kosteuspitoisuuden ja kyllästysasteen funktiona kosteuslähteen etäisyyden suhteen.

6.4 Tulokset

6.4.1 Hygrokooppiset tasapainokosteuskäyrät

Materiaalin kastuessa materiaalit saavuttivat kosteustasapainonsa taulukossa 6.2 esitettyssä ajassa.

Taulukko 6.2. Hygrokooppisen tasapainokosteuden saavuttaminen materiaalien kastuessa.

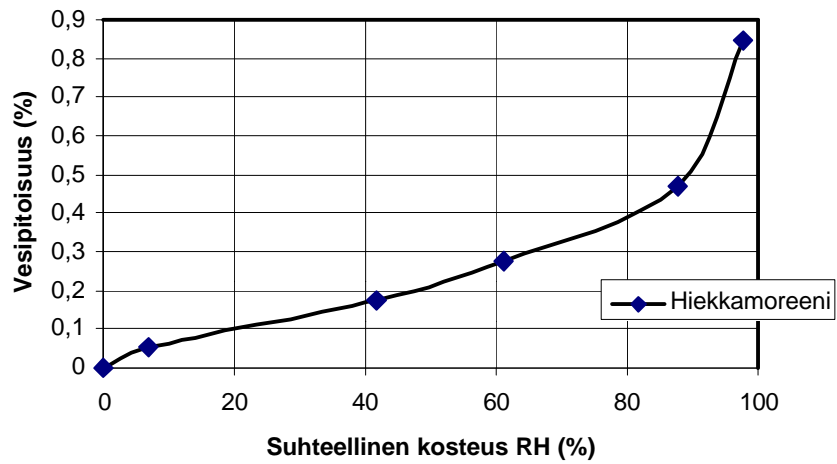
Maalaji	Aika (vrk) tasapainokosteuden saavuttamiseen
Moreeni	142 ... 203 vrk
Filleri, hieno hiekka	56 ... 86 vrk
Karkea hiekka	88 ... 103 vrk
Salaojasora (II)	73 ... 83 vrk
Salaojasora (I)	87 vrk
Sepeli	42 .. 43 vrk

Kappaleessa 6.1 esitetyille materiaaleille kappaleessa 6.2 selostetulla tavalla määritellyt hygrokooppiset tasapainokäyrät on esitetty kuvissa 6.10 – 6.24.

Moreenit

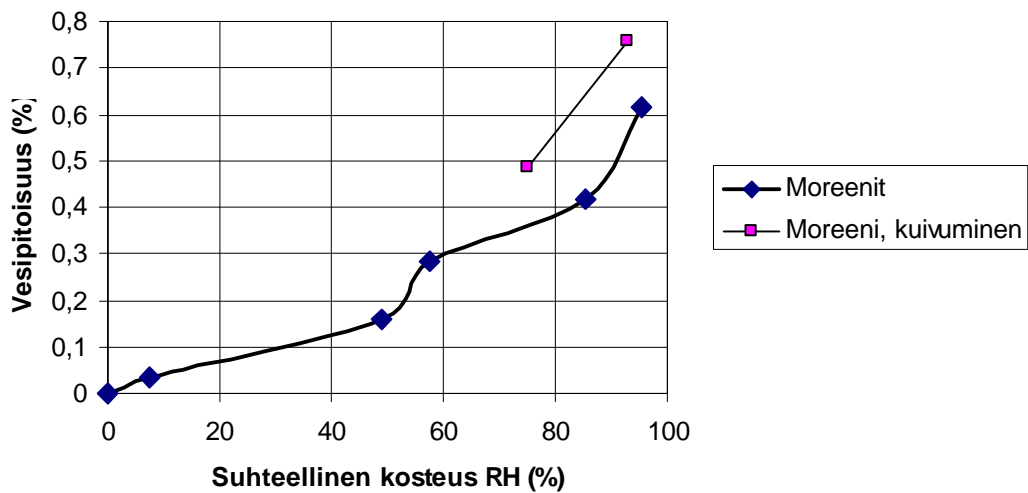
Hiekkamoreeni

Hiekkamoreenin tasapainokosteus, T=+5 C

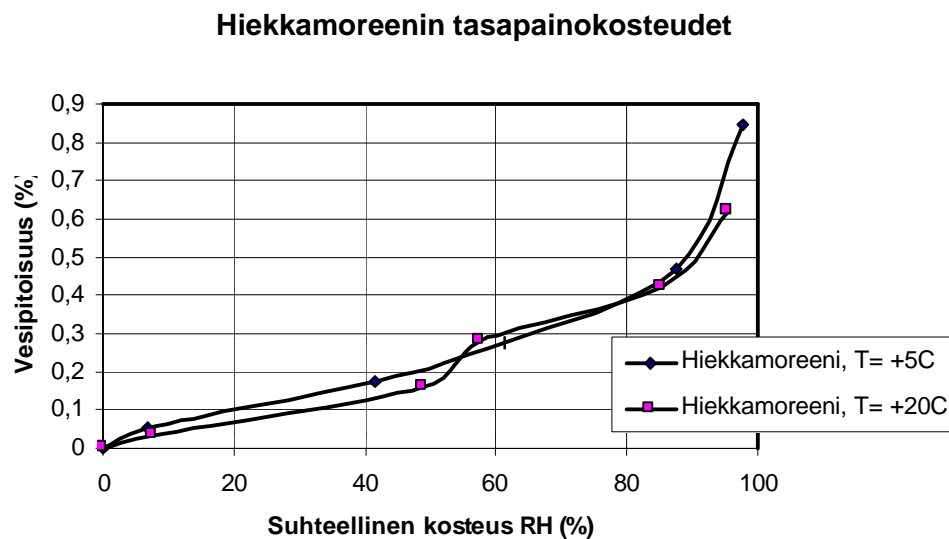


Kuva 6.10 Hiekkamoreenin hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +5 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä.

Moreenin tasapainokosteus, T=+20 C



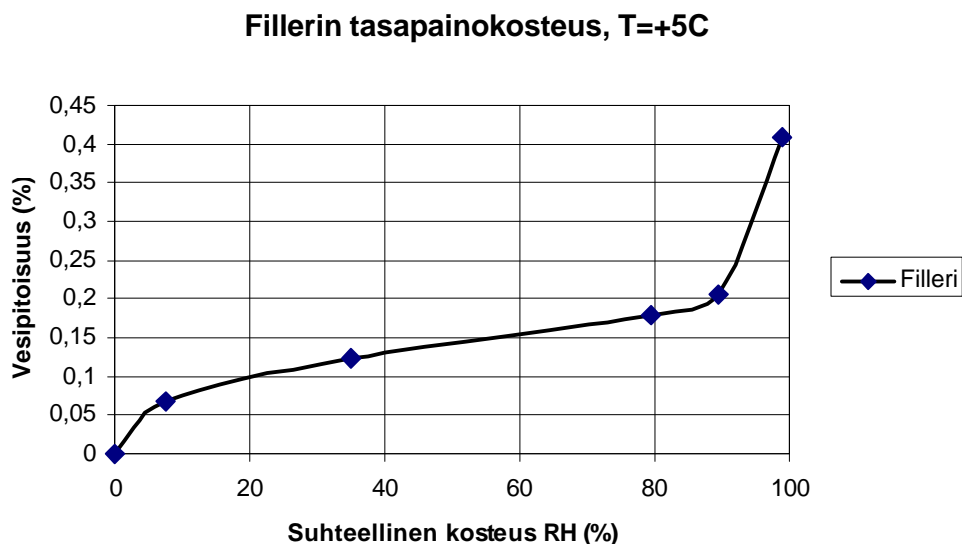
Kuva 6.11 Hiekkamoreenin hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +20 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä. Vertailuarvot materiaalin kuivumassa RH = 75 % ja 97%.



Kuva 6.12 Hiekkamoreenin hygroskooppiset tasapainokosteudet kastuessa eri lämpötiloissa.

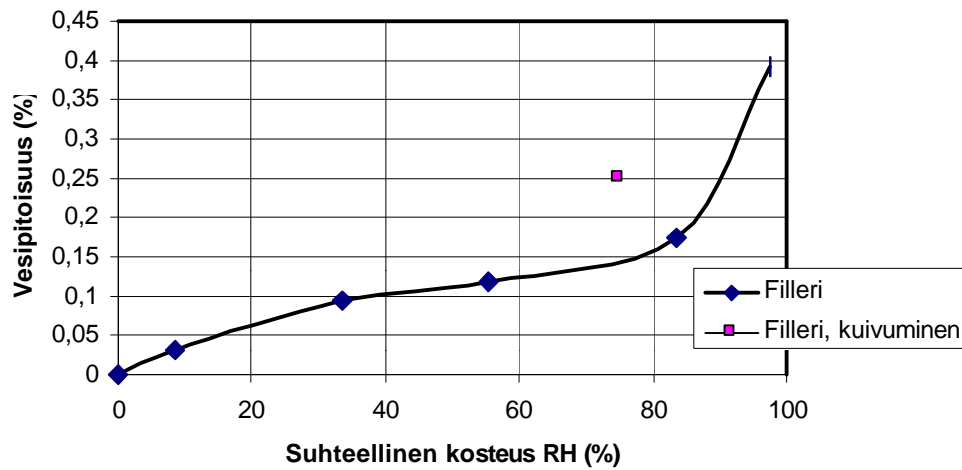
Hiekat

Filleri



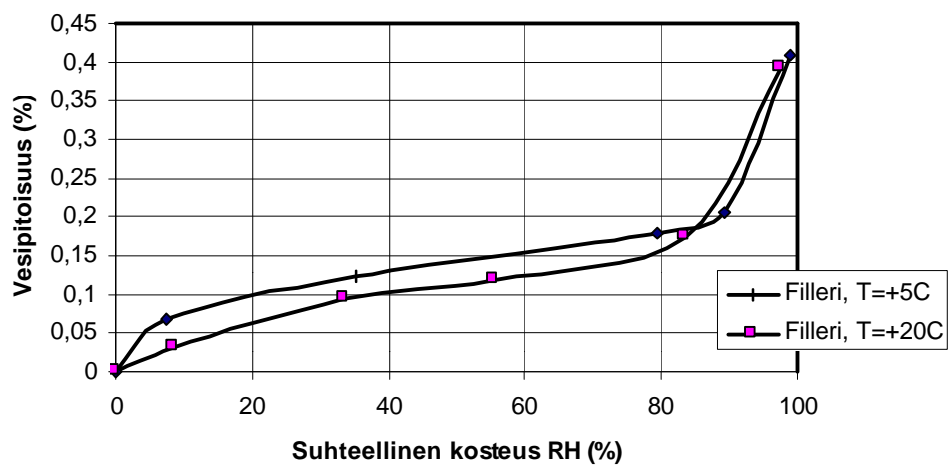
Kuva 6.13 Fillerin hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +5 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä.

Fillerin tasapainokosteus, T=+20C



Kuva 6.14 Fillerin hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +20 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä. Vertailuarvo materiaalin kuivumissa RH = 75 %.

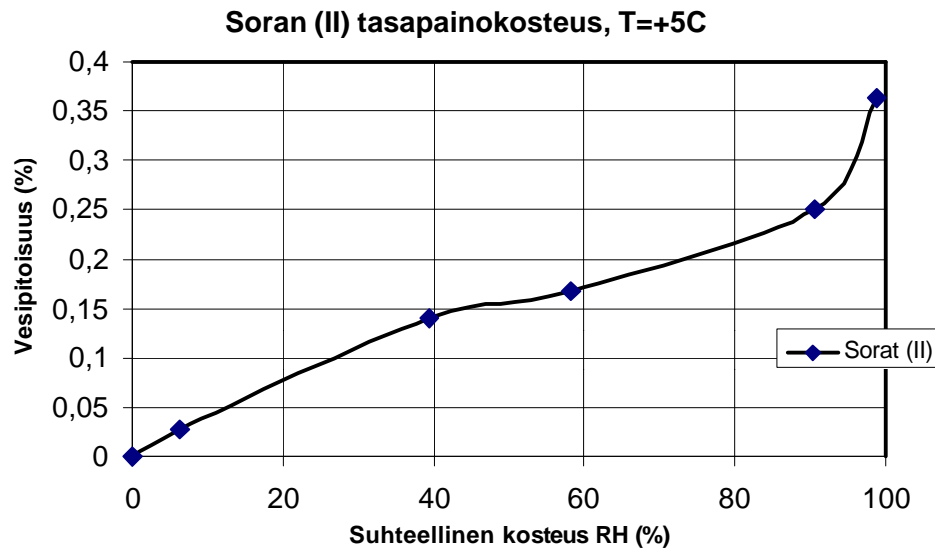
Fillerin tasapainokosteudet



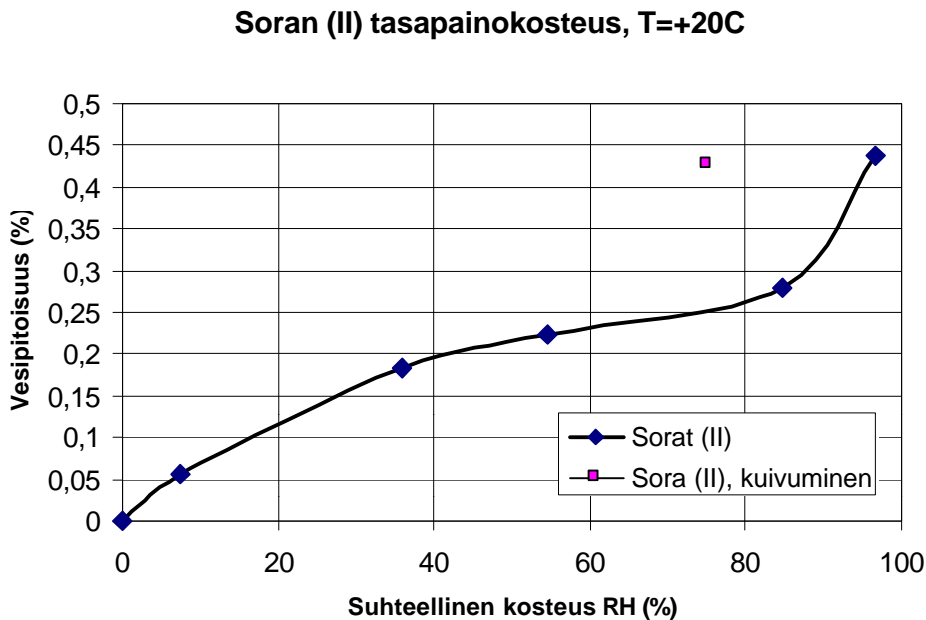
Kuva 6.15 Fillerin hygroskooppiset tasapainokosteudet kastuessa eri lämpötiloissa.

Salaojasorat

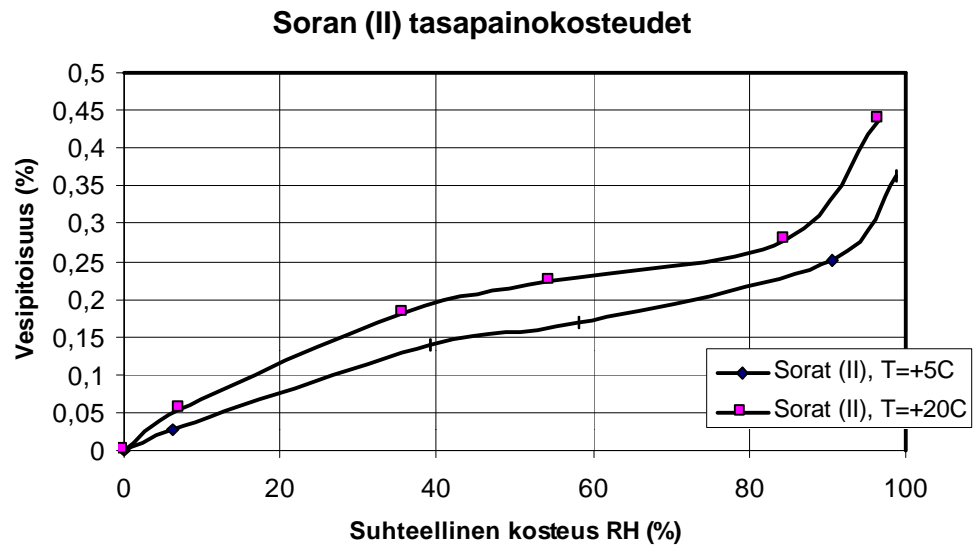
Ohjealueen II salaojasora



Kuva 6.16 Ohjealueen II salaojasoran hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +5 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä.

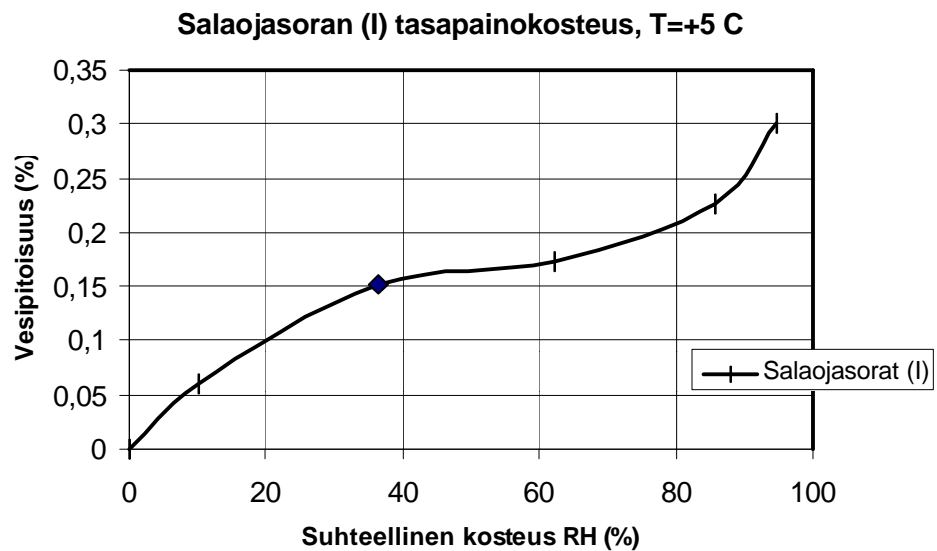


Kuva 6.17 Ohjealueen II salaojasoran hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +20 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä. Vertailuarvo materiaalin kuivuessa RH = 75 %.

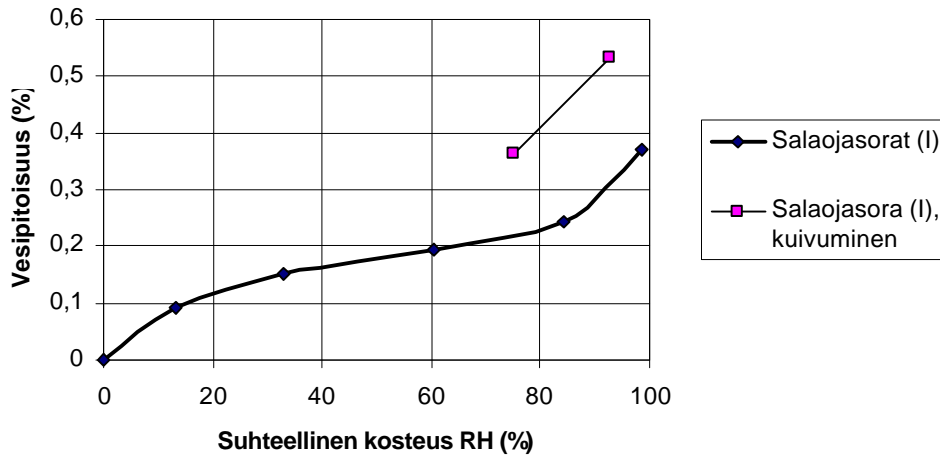


Kuva 6.18 Ohjealueen II salaojasoran hygroskooppiset tasapainokosteudet kastuessa eri lämpötiloissa.

Ohjealueen I salaojasora

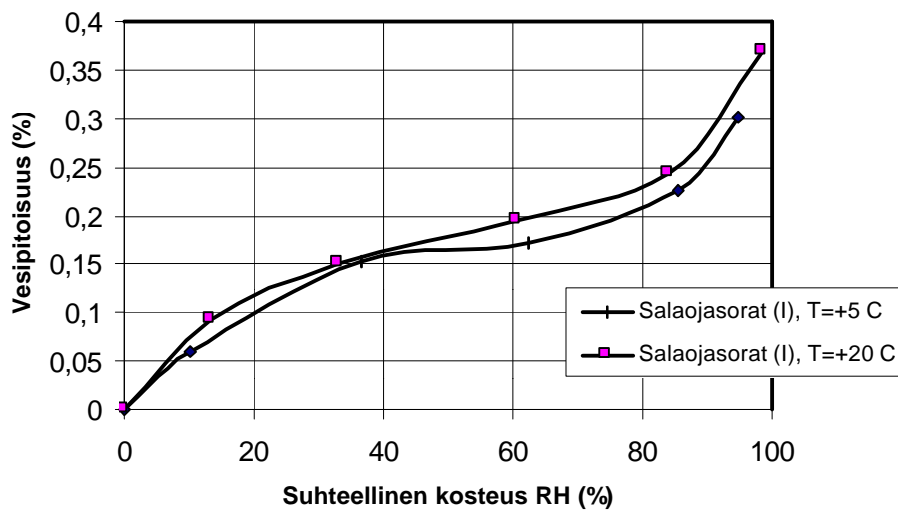


Kuva 6.19 Ohjealueen I salaojasoran hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T=+5 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä.

Salaojasoran (I) tasapainokosteus, $T=+20\text{ C}$ 

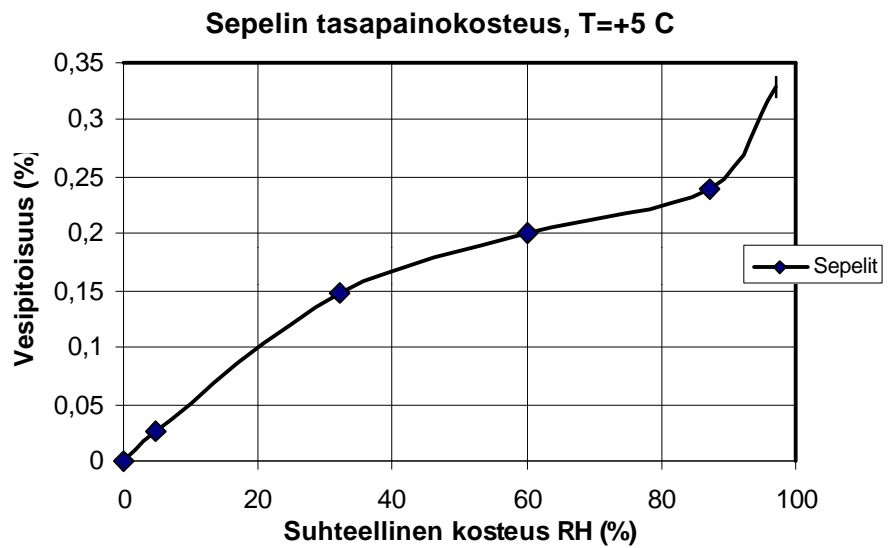
Kuva 6.20 Ohjealueen I salaojasoran hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, $T=+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, kolmen näytteen keskiarvokäyrä. Vertailuarvot materiaalin kuivussa $\text{RH} = 75\%$ ja 97% .

Salaojasoran (I) tasapainokosteudet

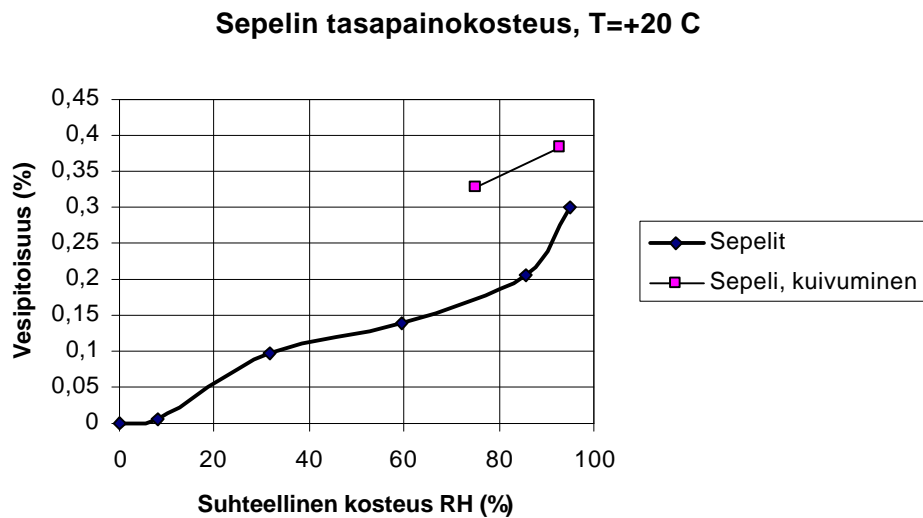


Kuva 6.21 Ohjealueen I salaojasoran hygroskooppiset tasapainokosteudet kastuessa eri lämpötiloissa.

Sepeli

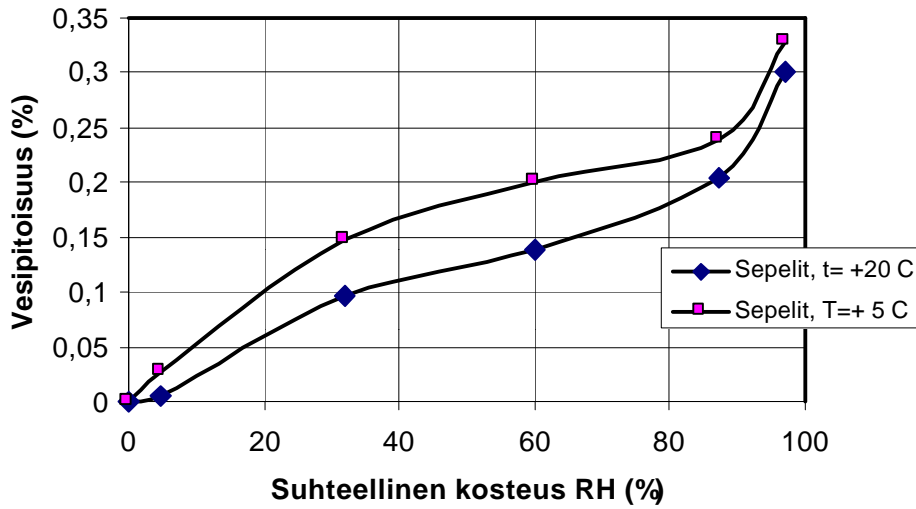


Kuva 6.22 Sepelin hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +5 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä.



Kuva 6.23 Sepelin hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +20 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä. Vertailuarvot materiaalin kuivuessa RH = 75 % ja 97%.

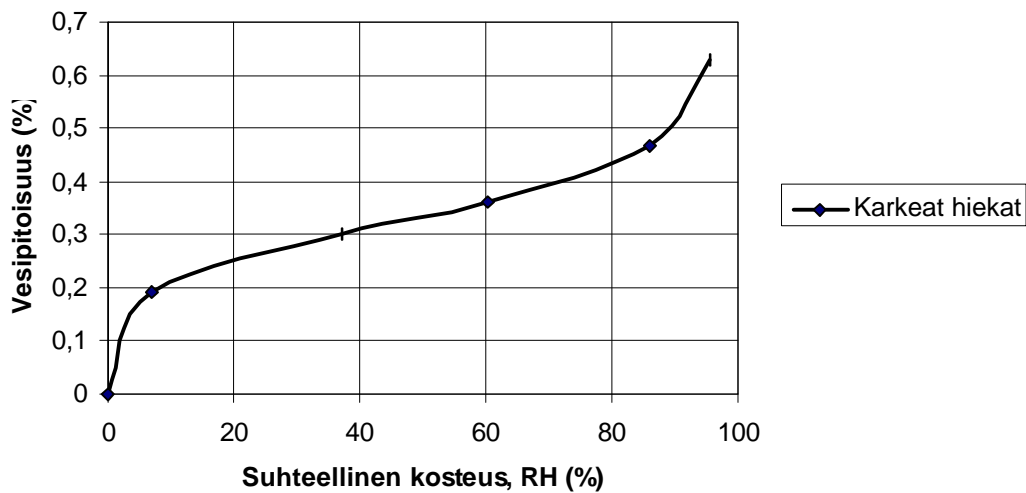
Sepelin tasapainokosteudet



Kuva 6.24 Sepelin hygroskooppiset tasapainokosteudet kastuessa eri lämpötiloissa.

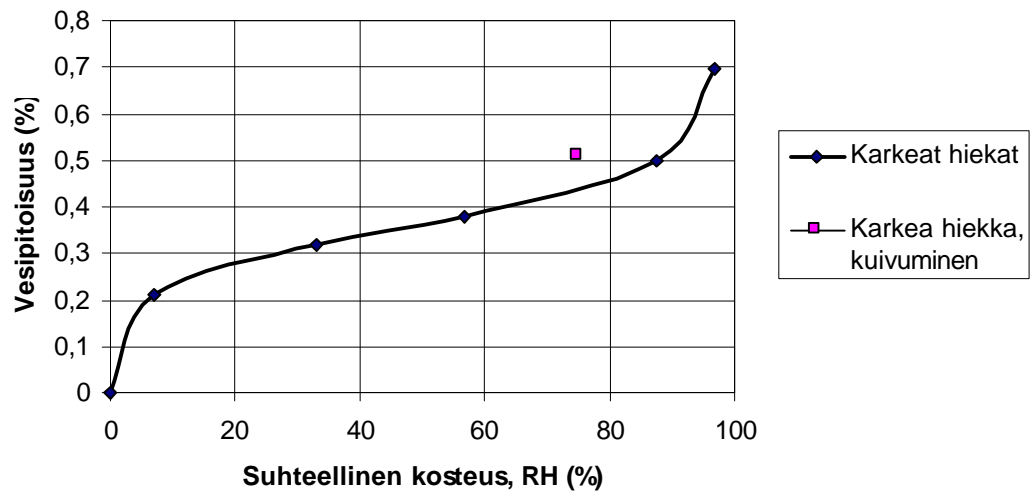
Karkea hiekka

Karkean hiekan tasapainokosteus, T=+5C



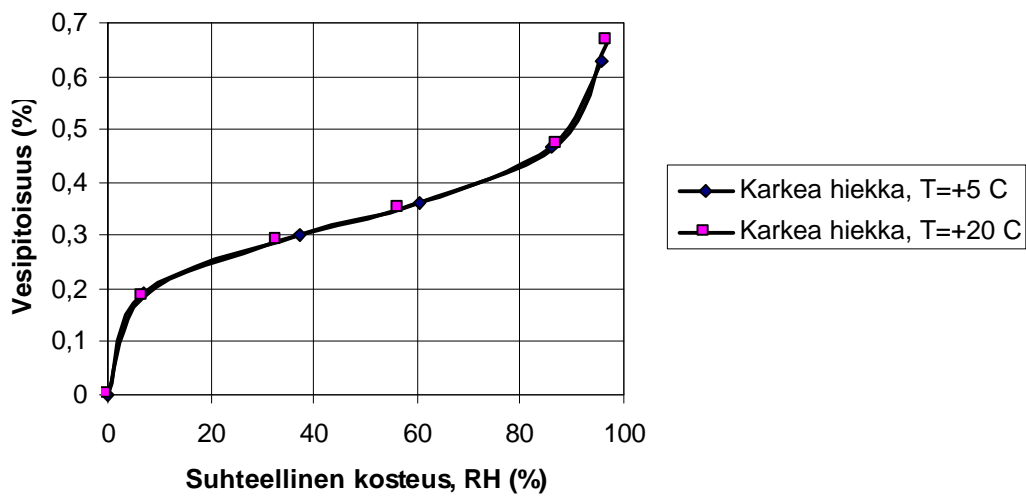
Kuva 6.25 Karkean hiekan hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +5 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä.

Karkean hiekan tasapainokosteus, T=+20C



Kuva 6.26 Karkean hiekan hygroskooppinen tasapainokosteus kastuessa, T= +20 °C, kolmen näytteen keskiarvokäyrä. Vertailuarvo materiaalin kuivumassa RH = 75 %.

Karkean hiekan tasapainokosteudet



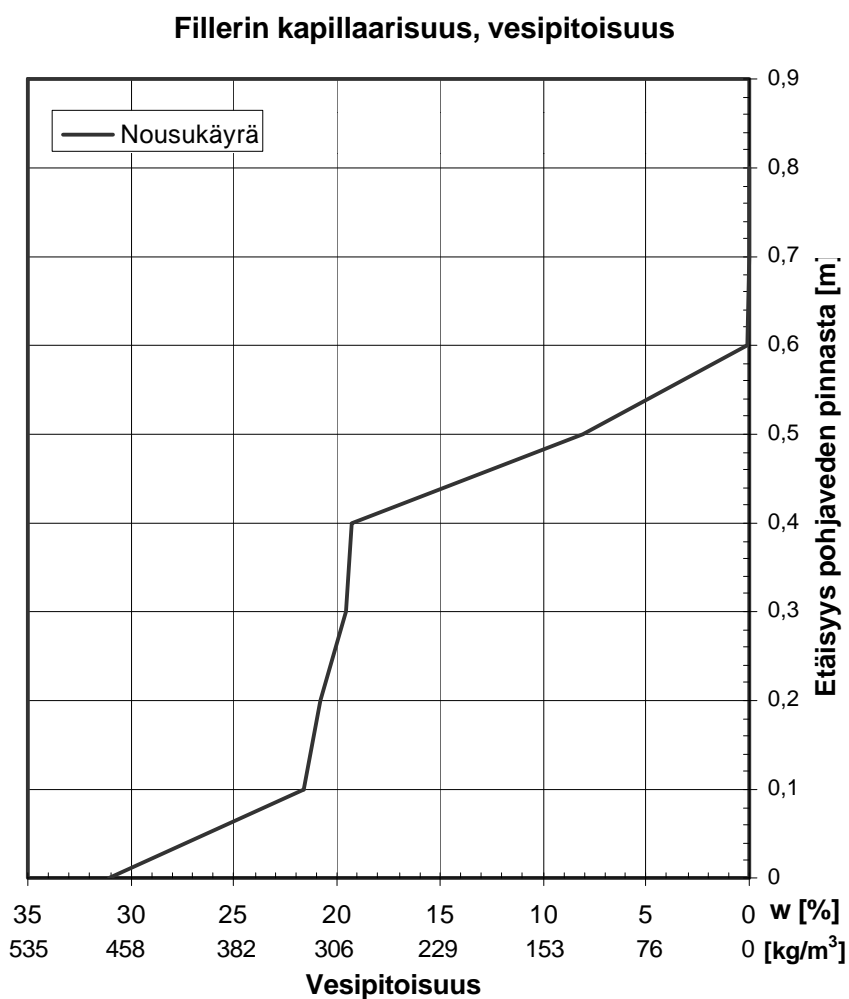
Kuva 6.27 Karkean hiekan hygroskooppiset tasapainokosteudet kastuessa eri lämpötiloissa.

Kapillaariset tasapainokosteuskäyrät

Kappaleessa 6.1 esitetyille materiaaleille kappaleessa 6.4 selostetulla tavalla määritellyt hygroskooppiset tasapaino- ja kapillaarivastuskäyrät on esitetty kuvissa 6.28 – 6.31.

Hiekat

Tutkitun fillerin kapillaarinen nousukäyrä on esitetty kuvassa 6.28. Tutkitun materiaalin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.4.

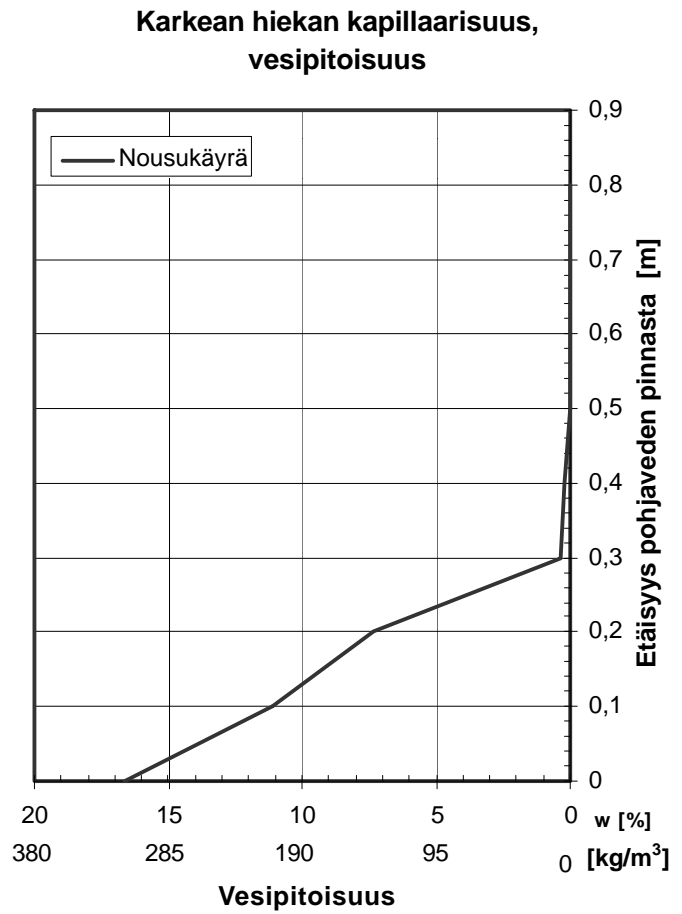
Filleri

Kuva 6.28 *Fillerin kapillaarinen nousukäyrä.*

Kapillaarimetrillä määritetty kapillaarinen nousukorkeus tutkitulla fillerillä oli $h = 0,53$ m.

Karkea hiekka

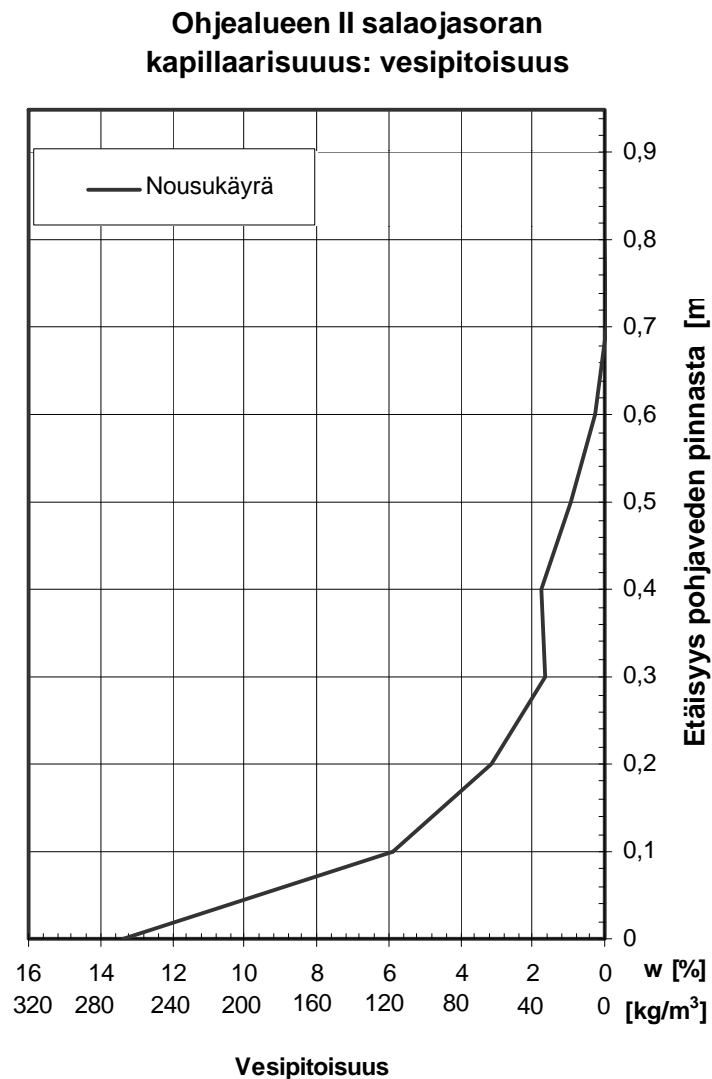
Tutkitun karkean hiekan kapillaarinen nousukäyrä on esitetty kuvassa 6.29. Materiaalin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.29 Karkean hiekan kapillaarinen nousukäyrä.

Ohjealueen II salaojasora

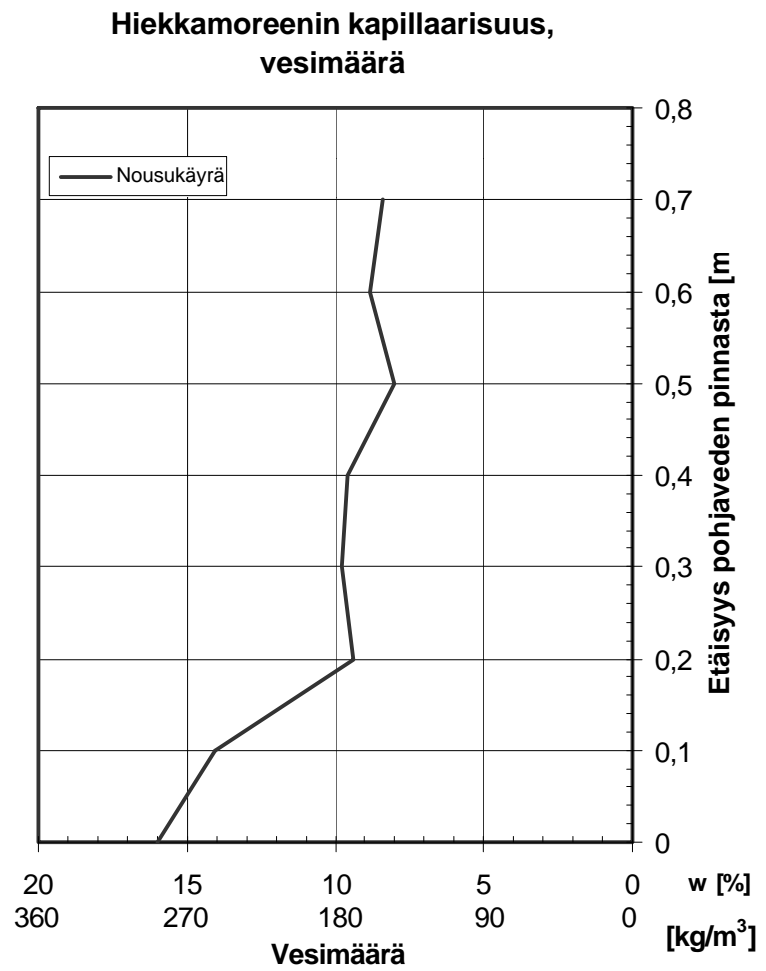
Tutkitun salaojasoran kapillaarinen nousukäyrä on esitetty kuvassa 6.30. RIL 126, Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus 1979 -ohjeiden mukaisesti 2 -luokan salaojitusmateriaalia käytetään normaalitapauksissa pohjaveden pinnan yläpuolella salaojituskerroksessa. Tutkitun materiaalin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.2.



Kuva 6.30 2 -luokan salaojasoran kapillaariset nousukäyrät.

Hiekkamoreeni

Tutkitun hiekkamoreenin kapillaarinen nousukäyrä on esitetty kuvassa 6.31. Moreenin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 6.3.



Kuva 6.31 Hiekkamoreenin kapillaarinen nousukäyrä.

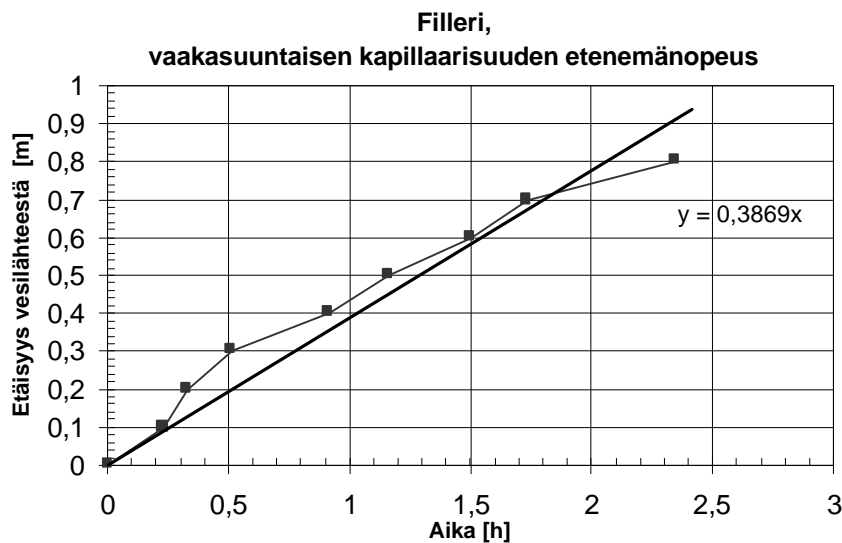
6.4.2 Vaakasuuntainen kapillaarisuus

Materiaalien vaakasuuntaista kapillaarisuutta tutkittiin kappaleessa 4 esitetyllä koejärjestelyllä samoilla materiaaleilla kuin pystysuuntaista kapillaarisuutta. Vaakasuuntaisen kapillaarisuuden tasapainokosteuskäyrät on esitetty kuvissa 6.32 ... 6.35.

Hiekat

Filleri

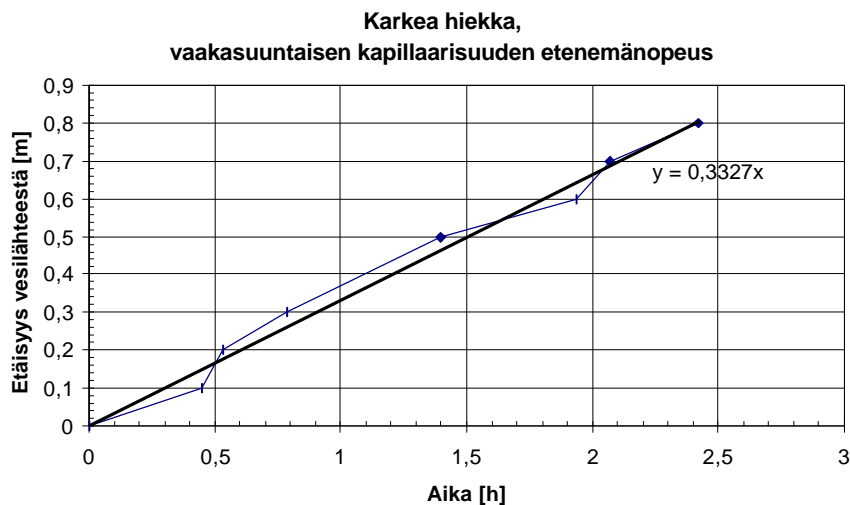
Fillerin vaakasuuntaiseksi kapillaariseksi etenemänopeudeksi suoritettulla koejärjestelyllä saatiin 0.0001 m/s eli 0.38 m/h.



Kuva 6.32 Fillerin vaakasuuntaisen kapillaarisuuden etenemänopeus

Karkea hiekka

Karkea hiekan vaakasuuntaiseksi kapillaariseksi etenemänopeudeksi saatiin 0.00009 m/s eli 0.33 m/h.



Kuva 6.33 Karkean hiekan vaakasuuntaisen kapillaarisuuden etenemänopeus.

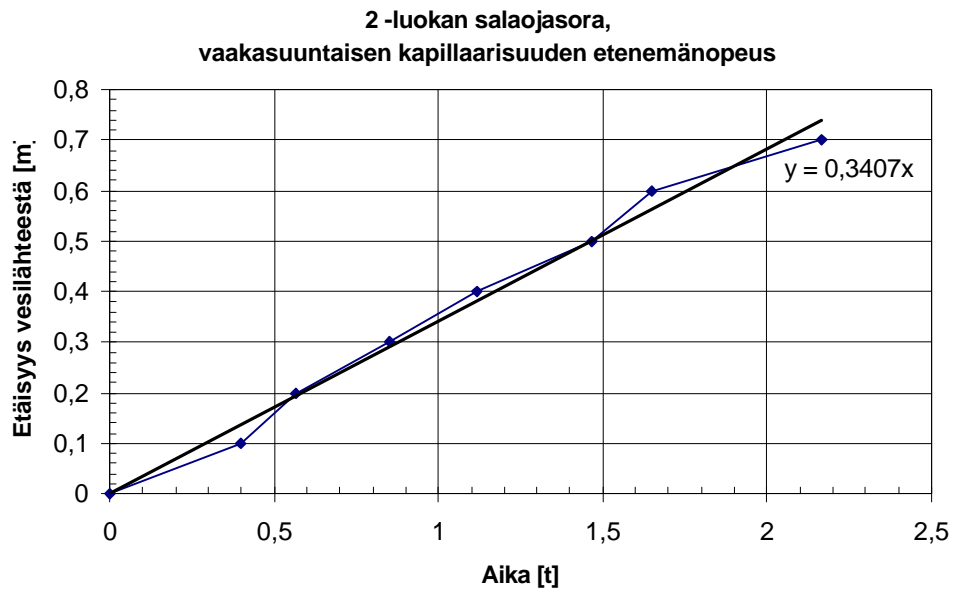
Sorat

Ohjealueen I salaojasora

Ohjealueen I salaojasorassa ei havaittu vaakasuuntaista kapillaarisuutta.

Ohjealueen II salaojasora

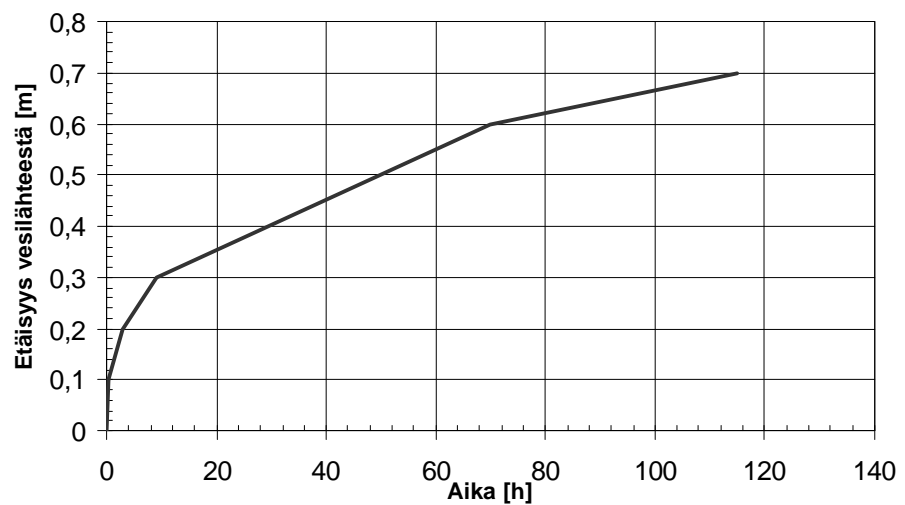
Ohjealueen II salaojasoran vaakasuuntaiseksi kapillaariseksi etenemänopeudeksi saatiin 0.00009 m/s eli 0.34 m/h .



Kuva 6.34 Ohjealueen II salaojasoran vaakasuuntaisen kapillaarisuuden etenemänopeus.

Hiekkamoreeni

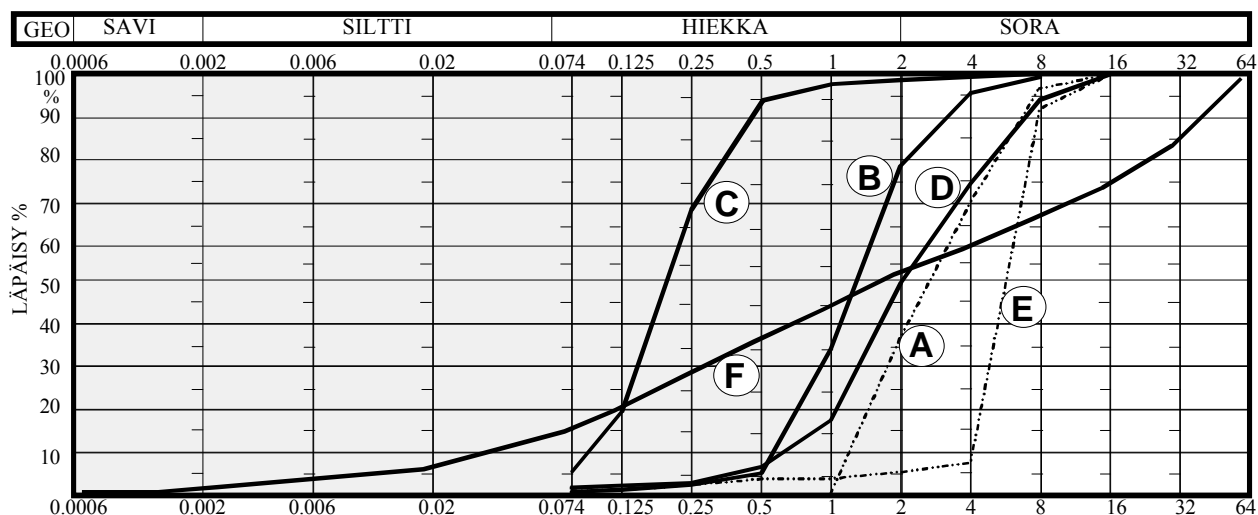
**Hiekkamoreenin vaakasuuntainen kapillaarisuus,
kapillaarisen rintaman etenemänopeus**



Kuva 6.35 Hiekkamoreenin vaakasuuntaisen kapillaarisuuden etenemänopeus.

6.5 Yhteenveto

Tutkittujen materiaalien rakeisuuskäyrät ja niihin liittyvät karakteristiset raekokojakaumaa kuvaavat rakeisuusominaisuudet on esitetty kuvassa 6.36 ja taulukossa 6.3.



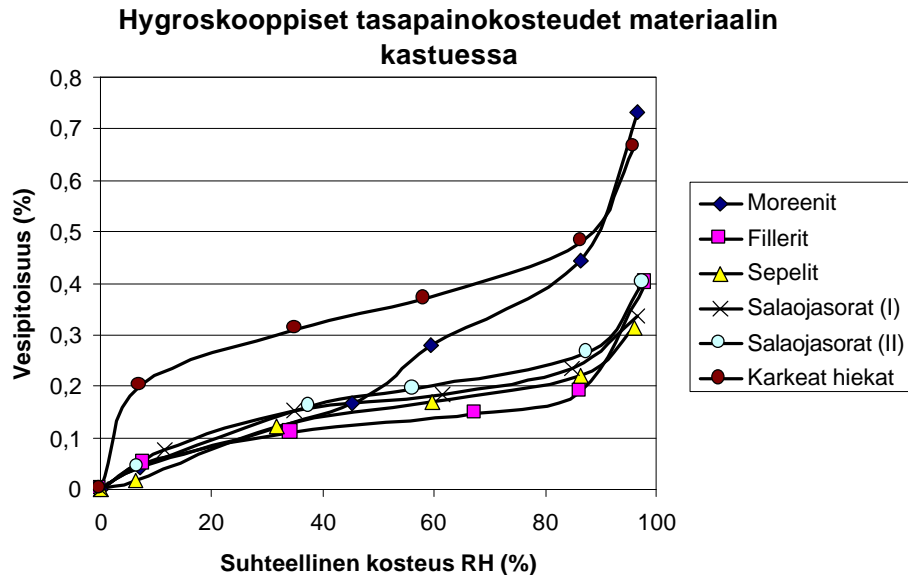
Kuva 6.36 Tutkittujen hiekkojen, sorien ja sepelien rakeisuuskäyrät.

a – 1-luokan salaojasora, b – 2-luokan salaojasora
 c – filleri, d – karkea hiekka
 e – sepele, f – hiekkamoreeni

Taulukko 6.3 Tutkittujen hiekkojen, sorien, sepelin ja hiekkamoreenin rakeisuusominaisuudet.

Maalaji	< 0.074 [%]	d ₁₀ [mm]	d ₂₀ [mm]	d ₆₀ [mm]	d ₁₀ /d ₆₀
A – 1 lk salaojasora	0	1.3	1.5	3.2	0.41
B – 2 lk salaojasora	1.3	0.6	1.1	2.8	0.39
C – filleri	5.5	0.08	0.125	0.22	0.57
D – karkea hiekka	0.3	0.6	0.75	1.6	0.47
E – sepele	0.4	4.1	4.6	6.5	0.71
F – hiekkamoreeni	15	0.038	0.125	4.0	0.03

Tutkituille materiaaleille saatiin kuvan 6.37 mukaiset hygroskooppiset tasapainokosteuskäyrät. Kaikille muille materiaaleille paitsi moreenilla ja karkealla hiekalla hygroskooppinen tasapainokosteus materiaalin kastuessa RH 100%:ssa oli alle 0,5 paino-%. Moreenille hygroskooppinen tasapainokosteus oli suurin, noin 0,8 paino-%. On huomattavaa, että kuvan käyrät määrittelevät, kuinka paljon materiaaliin sitoutuu vettä kun kuivan materiaalin annetaan kastua. Märän materiaalin annettua kuivua määritellyt tasapainokosteuden olivat hystereesi-ilmiön vuoksi jonkin verran suurempia.



Kuva 6.37 Tutkittujen materiaalien tasapainokosteuskäyrät

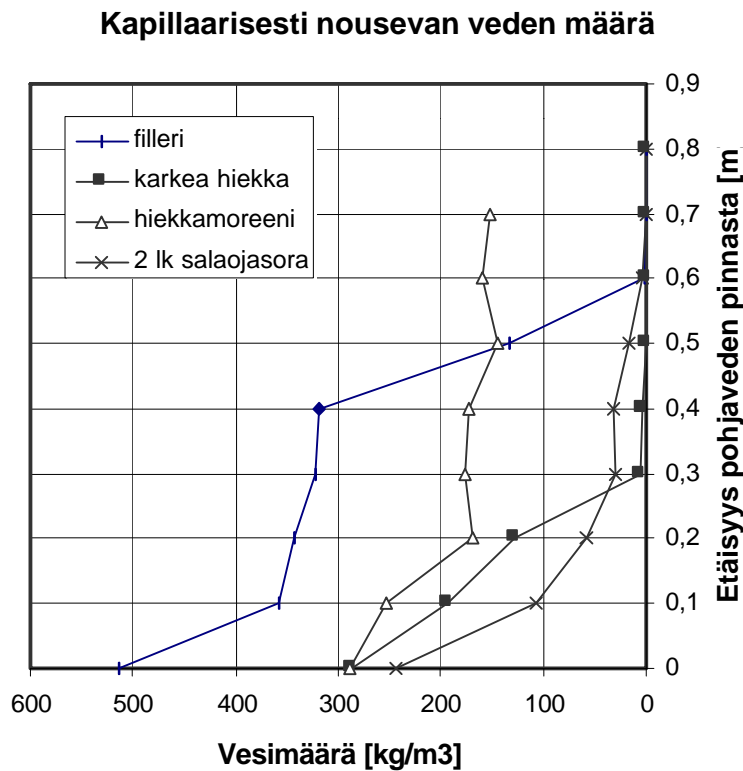
Kapillaarisesti nousseen veden määrä tutkituissa näytteissä on esitetty kuvassa 6.38. Suurimman vesimäärän vesilähteen pinnasta nosti fillerit, jonka huokosluku suoritetuissa mittauksissa oli suuri $e = 0.6$ ja jossa vettä kuljettavia huokoskanavia näin ollen myös on runsaasti. Fillerissä nousevan veden määrä onkin melko tasainen aina ylempään kapillaariseen nousukorkeuteen asti, koska huokosrakenne on homogeeninen materiaalin tasarakeisuudesta johtuen.

Korkeimmalle vesi nousi hiekkamoreenissa, jonka lopullinen nousukorkeus oli selvästi yli kokeessa mitatun nousun eli $> 0,7$ m. Moreenissa nouseva vesimäärä myös pysyy melko tasaisena ainakin tässä mitatun nousun osalta. Samoin moreenin käyrässä on selvästi havaittavissa alemman kapillaarisen nousukorkeuden raja, joka sijoittuu 0,2 – 0,3 m välille. Tätä alempana materiaalin huokokset ovat lähes täysin vedellä kyllästetyssä tilassa. Moreenin kuljettama vesimäärä on selvästi filleriä pienempi, mikä johtuu materiaalin huomattavasti pienemmästä huokosluvusta $e \approx 0,3$. Vettä ei mahdu kulkemaan ylöspäin yhtä paljon kuin fillerissä, koska avoimia huokosia eli tilaa veden kuljettamiseen on vähemmän.

Karkean hiekan kapillaarinen nousukorkeus oli noin $h \approx 0.25$ m ja ylöspäin kulkeutuvan veden määrä väheni selvästi korkeuden funktiona. Karkean hiekan huokosluku oli $e = 0,5$.

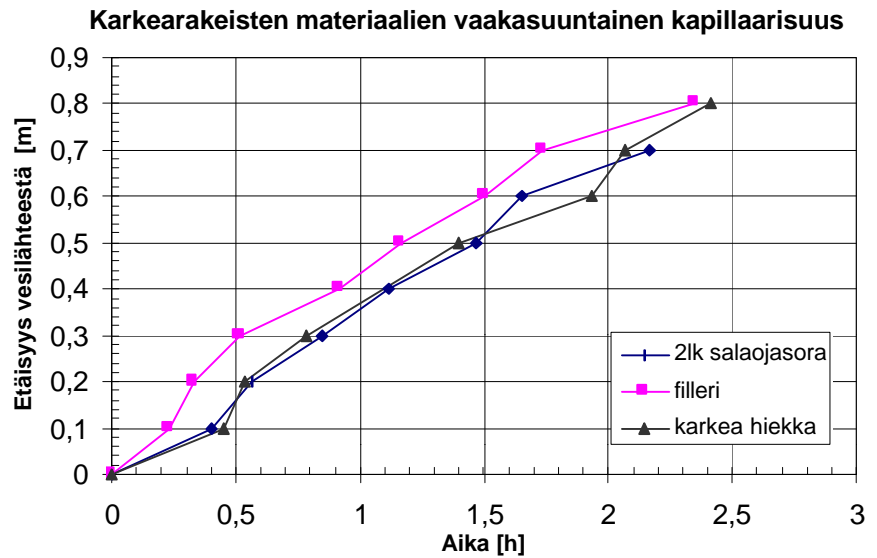
II luokan salaojasoran kapillaarinen nousukorkeus oli $h \approx 0,5$ m eli korkeampi kuin karkean hiekan, koska tutkitun näytteen hienoainepitoisuus oli selvästi suurempi. Toisaalta näytteen huokosluku $e = 0,45$ oli pienempi kuin karkean hiekan, mistä syystä nousevan veden määrä oli pienempi.

Pestyn I luokan salaojasoran kapillaarinen nousukorkeus oli silmämääräisesti noin 5 cm. Sepelissä ei kapillaarista nousua havaittu lainkaan.

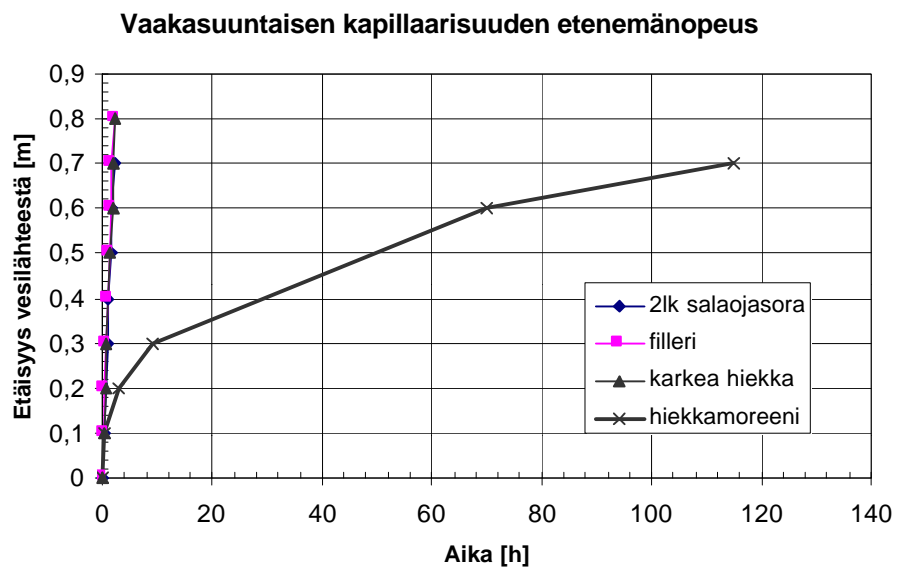


Kuva 6.38 Tutkittujen materiaalien pohjaveden pinnasta kapillaarisesti nostama vesimäärä korkeustason funktiona.

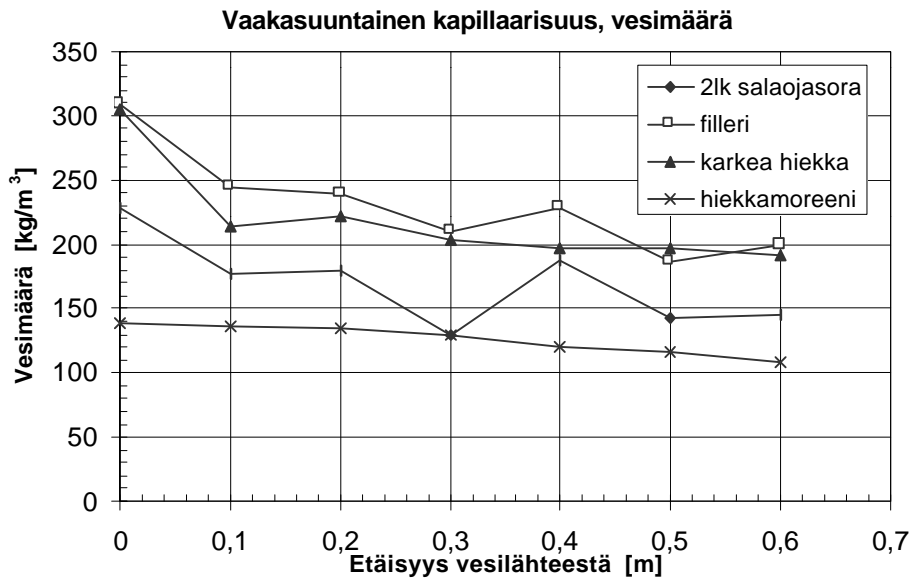
Vaakasuuntaista kapillaarisuutta tutkittiin kapillaarisen rintaman etenemänopeuden ja siirtyvän vesimäärän suhteen. Niiden materiaalien osalta, joissa vaakasuuntaista kapillaarisuutta havaittiin, kapillaarisen rintaman etenemänopeus näytteissä on esitetty kuvissa 6.38 ja 6.39. Hiekoilla ja II luokan salaojasoralla ei kapillaarisessa etenemänopeudessa havaittu suuria eroja. Rintaman etenemänopeus koko tutkitun 1 m pituisen näytteen päähän asti oli noin 0,35 m/h. Hiekkamoreenissa, jossa veden liikettä hidastaa oleellisesti pienten huokosten aiheuttama virtausvastus, rintaman eteneminen hidastuu etäisyyden funktiona vesilähteestä (kuva 6.39). Veden vaakasuuntainen liike moreenissa oli selvästi hita ampaa kuin karkeampirakeisissa materiaaleissa. Samoin siirtyvän veden määrä oli pienempi johtuen moreenin pienemmästä huokosluvusta (kuva 6.40). Kaikkien materiaalien osalta havaittiin selvä yhteys materiaalin huokosluvun ja vaakasuuntaisesti kapillaarivoimien vaikutuksesta siirtyvän veden määrän välillä kuvan 6.41 mukaisesti.



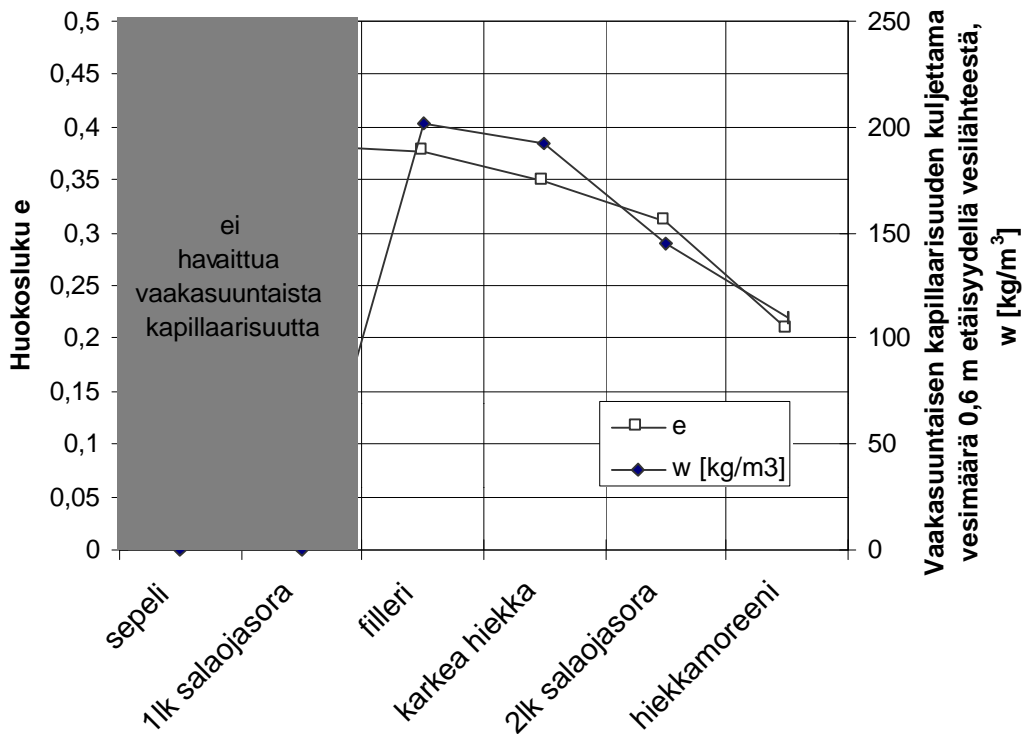
Kuva 6.38 Vaakasuuntaisen kapillaarisuuden etenemänopeus tutkituilla hiekoilla ja II luokan salaojitusoralla.



Kuva 6.39 Hiekojen, II luokan salaojasoran ja hiekkamoreenin vaakasuuntainen etenemänopeus.



Kuva 6.40 Tutkittujen hiekkojen, II luokan salaojasoran ja hiekkamoreenin vaakasuuntainen kapillaarisuuden kuljettama vesimäärä.



Kuva 6.41 Huokosluvun suhde vaakasuuntaisen kapillaarisuuden kuljettamaan vesimäärään 0,6 m etäisyydellä vesilähteestä.

Vaakasuunnassa siirtyvän veden määrä laskee hieman etäisyyden funktiona, mutta se on silti huomattavan suuri mitatuissa näytteissä 0,6 metrin etäisyydellä vesilähteestä, keskimäärin 150kg/m^3 .

7 Kosteuden siirtymisen mittauslaitteisto

Tutkimuksen yhteydessä kehitettiin vapaan veden siirtymistä mittaava mittauslaitteisto, jolla veden siirtymistä alapohjien täyttö- ja salaojituserroksissa on tarkoitus mitata jatkotutkimusten yhteydessä.

7.1 Vesipitoisuuden mittausmenetelmät

Erilaisia menetelmiä on kehitetty tasapainokosteuden määrittämiseen kosteusalueella RH 98% ... kapillaarikyllästyminen. Janz /Janz, 1997/ lisensiaattitutkimuksessaan on esitellyt lyhyesti tärkeimpiä.

7.1.1 Leikkaus - kuivatus - punnitus –menetelmä

Näytteen vesipitoisuusjakaumaa mitattaessa näyte leikataan osiin, punnitaan, kuivataan, ja punnitaan uudelleen. Näytteen sisältämä vapaan veden määrä saadaan punnitustulosten erotuksesta. Näytteen kuivatus voidaan suorittaa eri tavoin, tavanomaisin on kuivata näytettä +105°C asteisessa uunissa, kunnes näytteen paino ei enää muutu.

Mittausmenetelmällä näytteestä voidaan mitata vesipitoisuusprofiili vain kerran, joten ajan suhteen mitattuja nousukäyriä määritettäessä tarvitaan useita suhteellisen homogeenisia näytteitä. Mikäli näytteen leikkauksen yhteydessä ei kappaleista pääse haihtumaan liikaa vettä ja yksittäisen mitattavan kappaleen korkeusasema näytetyssä pystytään määrittämään tarkasti, on tämä tarkin vesipitoisuuden mittausmenetelmä. Menetelmä onkin paras keino muitten mittausmenetelmien kalibroinnissa.

7.1.2 Sähköiset menetelmät

Sähköisten menetelmien yhteydessä mittaus voidaan suorittaa useaan otteeseen samasta näytekappaleesta.

Rakeisten materiaalien sähkönjohtavuus kasvaa huokosissa olevan veden määrän kasvaessa. Mittaamalla kahden elektrodin välillä olevan massan sähkövastuksessa tapahtuvia muutoksia voidaan arvioida vesipitoisuuden muuttumista materiaalissa. Vesipitoisuuden määrittämiseksi on laboratoriossa määritettävä materiaalikohtainen kalibrointikäyrä. Sähkönjohtavuuteen vaikuttavat voimakkaasti vesipitoisuuden lisäksi esimerkiksi veden suolapitoisuus, tiheys ja lämpötila, mikä tekee menetelmästä epäluotettavan, mikäli jokin näistä tekijöistä muuttuu vesipitoisuuden ohella. Ympäristön suolapitoisuuden muutokset voidaan eliminoida käyttämällä erillisestä materiaalista (esimerkiksi puusta) tehtyä sensoria, joka asetetaan mitattavan kappaleen sisään ja suojataan ympäristön suolapitoisuuden muutoksilta. Sensorin kosteustasapaino muuttuu viiveellä ympäristöään vastaavaksi, jolloin tarvitaan vain käytetyn sensorimateriaalin kalibrointikäyrä koko näytteen vesipitoisuuden määrittämiseksi.

Myös rakeisten materiaalien kapasitanssi kasvaa huokosveden määrän lisääntyessä. Kapasitanssimenetelmässä hyödynnetään veden suurta dielektrisyttä, joka esimerkiksi taajuudella 1 GHz on 10 – 40 kertaa suurempi kuin kuivan rakennusmateriaalin. Veden

määrän muutos materiaa lissa saadaan siis massan kapasitanssin muutoksesta. Kapasitanssimenetelmä on vähemmän herkkä huokosveden suolapitoisuudelle tai massan tiheydelle kuin sähkönjohtavuuteen perustuvat menetelmät. Kapasitanssimenetelmä vaatii kuitenkin monimutkaisemmat mittau sjärjestelyt. Betonilla tehtyjen mittausten perusteella menetelmän virhe vesipitoisuudessa on noin ± 0.25 % vesipitoisuuden arvoilla 0-6.5 %.

7.1.3 Gamma-säteilyn vaimentuminen

Mittaamalla kapean gamma-säteen intensiteetin muutosta sen kulkiessa rakeisen materia alin läpi voidaan määrittää sekä mitattavan massan vesipitoisuus että tiheys. Säteilylähteestä mittaasanturille kulkiessaan osa gamma -säteistä (fotonit) reagoivat materiaalihiukkasten pintaelektronien kanssa ja muuttavat suuntaansa tai absorboituvat materi aaliin. Kalibroimalla säde mitattavalle materiaalille voidaan määrittää massan vesipitoisuus ± 0.5 paino-% tarkkuudella. Menetelmä on kallis ja vaatii erillisiä suojoitoimia radioaktiivisen prosessinsa takia.

7.1.4 Neutroni radiografia

Myös neutroni radiografia käyttää hyväkseen säteilyä vesipitoisuutta mitattaessa. Gamma -säteilystä poiketen käytettävät neutronit reagoivat lähinnä vety nukleiinien kanssa. Säteilyn vaimeneminen lähteen ja mittaasanturin välillä kertoo siis suoraan vesipitoisuuden muutoksesta mitattavassa massassa. Menetelmää käytettäessä säteilysuojatoimenpiteet ovat välttämättömiä, samoin erikoiskoulutetun mittaushenkilöstön käyttö.

7.1.5 Atomien magneettinen resonanssi

Atomien magneettinen resonanssi (NMR) -menetelmässä vety molekyylit 'lasketaan' mitattavasta massasta. Materiaalin magneettisuus liittyy vety nukleiinien sisäiseen pyörimiseen. NMR menetelmässä luodaan pysyvä ulkoinen magneettikenttä, jota vastaan kohtisuoraan luodaan elektromagneettinen kenttä. Osa energiasta absorboituu tutkittavaan materiaaliin. Absorboituneen energian määrä on verrannollinen tutkittavan näytteen sisältämien vetynukleiinien määrään. NMR menetelmällä voidaan mitata kaikkien vetyatomeita sisältävien nesteiden pitoisuuksia.

Menetelmän tarkkuus on 0.5 – 0.1 paino -% vesipitoisuutta mitattaessa. Menetelmällä voidaan myös erotella näytteen sisältämän vapaan veden, fysikaalisesti sitoutuneen veden ja kemiallisesti sitoutuneen veden määrä. Menetelmän heikkous on tarvittavan laitteiston kalleudessa.

7.1.6 Tietokonetomografia

Tietokonetomografiassa mitataan röntgensäteiden intensiteetin laskua sen kulkiessa näytteen läpi. Absorptiosta voidaan laskea näytteen tiheys, ja sitä mitataan ns. CT -arvolla. Käytetty absorboitumisasteikko kalibroidaan tislattun veden avulla, jonka CT -arvo on 0. Ilman absorptioarvo sen sijaan on -1000 , joka tarkoittaa 100 % vähemmän absorptiota tislattuun veteen verrattuna. Röntgensäteiden CT -luku betonissa on yleensä $1450 - 1500$, eli absorptiota tapahtuu $145 - 150$ % enemmän kuin vedessä. Ilman ja veden CT -arvojen erotuksen avulla voidaan määrittää näytteen vesipitoisuus, eli veden määrä suhteessa ilmaan materiaalin huokosissa.

7.1.7 Mikroaalto säteily

Mikroaalto säteilytyksessä näytteen läpi kulkeutuvan säteilyn vaimenemisesta määritetään näytteen vesipitoisuus. Mikro aaltojen vaimenemiseen vaikuttaa oleellisesti materiaalin dielektrisyys ja veden dielektrinen vakio on $10 - 40$ kertaa kuivien rakennusmateriaalien vastaavia suurempi. Mittauslaitteisto on kalibroitava tutkittavalle materiaalille. Mikäli säteily kokeen aikana on liian voimakasta, vapaan veden lämpötila kohoaa huomattavasti ja lämpötilagradientti voi aiheuttaa nesteen virtauksen näytteen sisällä.

7.1.8 Lämmönjohtavuus

Rakeisen materiaalin lämmönjohtavuus kasvaa massan vesipitoisuuden kasvaessa. Kalibroimalla materiaalin vesipitoisuuden ja lämmönjohtavuuden välinen yhteys voidaan menetelmällä määrittää näytteen vesipitoisuus.

Menetelmässä näytteeseen kehitetään paikallisesti tietty lämpömäärä ja näytteen lämpötilan muutos mitataan ajan funktiona tunnetun etäisyyden päässä olevalla anturilla. Saatua aika - lämpötila -kuvaaja kertoo materiaalin lämmönjohtavuuden. Mikäli materiaalin vesipitoisuuden ja lämmönjohtavuuden välinen riippuvuus on tiedossa, voidaan mittauksella määrittää näytteen vesipitoisuus. Lämpölähte synnyttää kuitenkin myös lämpötilagradientin näytteen sisälle, mikä johtaa veden virtaukseen ja virheeseen mittausmenetelmässä. Menetelmän tarkkuus voi kuitenkin olla ± 1 paino-% vesipitoisuutta mitattaessa.

7.1.9 Lämpökuvauus

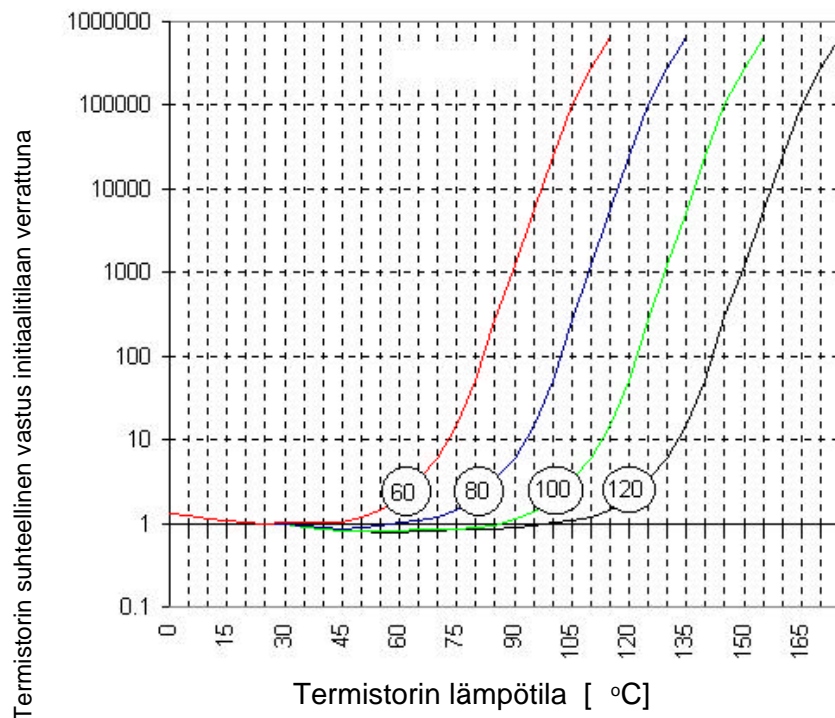
Menetelmä perustuu nesteen höyrystyessä tapahtuvaan ympäristön lämpötilan laskuun. Mittauksessa näyte halkaistaan ja halkaistu pinta kuvataan infrapunakameralla. Kuvan lämpötilajakaumasta arvioidaan näytteen vesipitoisuus pinnan eri kohdissa. Mittaus tuhoaa tutkittavan näytteen ja infrapunakuvan kalibroiminen tutkittavalle materiaalille on hankalaa. Kuva on kalibroitava tunnetuissa vesipitoisuuksissa olevilla näytteillä, kokeet on tehtävä vakiolämpötilassa ja ilmankosteudessa, ja lisäksi kuva on otettava aina samalla ajan hetkellä näytteen halkaisun jälkeen.

7.2 Kehitetty maan lämmönjohtavuuden perustuva mittausmenetelmä

Pohjamaan lämpötila- ja kosteusolosuhteiden määrittämiseksi kenttäolosuhteissa olemassa olevista alapohjarakenteista kehitettiin PTC -termistoreihin perustuva sauvamainen mittausanturi, joka maamassan lämmönjohtavuuden muutosten perusteella kertoo kosteuspitoisuuden muutokset. Laitteisto on rakennettu ohueen muoviputkeen, $d = 16$ mm, joka voidaan asentaa pohjalaatan alapuoliseen maahan joko rakennustyön yhteydessä tai valmiiseen rakenteeseen poraamalla reikä alapohjarakenteiden läpi ja kairaamalla asennusreikä salaojakerrokseen ja pohjamaahan. 0.5 – 2 metrin mittainen sauva asennetaan reikään siten, että sauvan pinnasta hieman ulkonevat termistorit ovat tiiviissä kosketuksissa ympäröivän maamassan kanssa. Anturin perusmallissa on 10 termistoria, jotka mittaavat maamassan kosteutta 10 cm välein. Pohjamaan lämpötilamittaukset suoritetaan samalla sauva-anturilla, jossa lämpötila -anturit on asennettu putken sisään 20 cm välein PTC -antureiden väleille.

PTC termistorin toiminta perustuu sen vastusominaisuuksien voimakkaaseen riippuvuuteen termistorin lämpötilasta. Kuvan 7.2 mukaisesti PTC -termistorin vastus kasvaa voimakkaasti tietyn rajalämpötilan ylittymisen jälkeen.

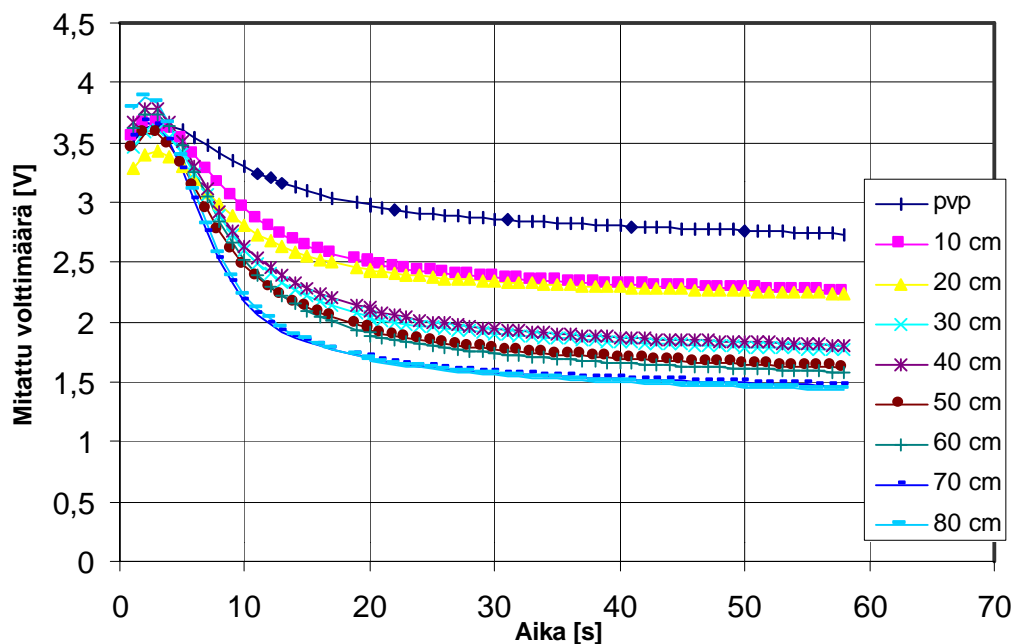
PTC -termistorin vastuksen lämpötilariippuvuus



Kuva 7.2 PTC -termistorin vastuksen lämpötilariippuvuus. Termistorin rajalämpötilat 60, 80, 100 ja 120°C.

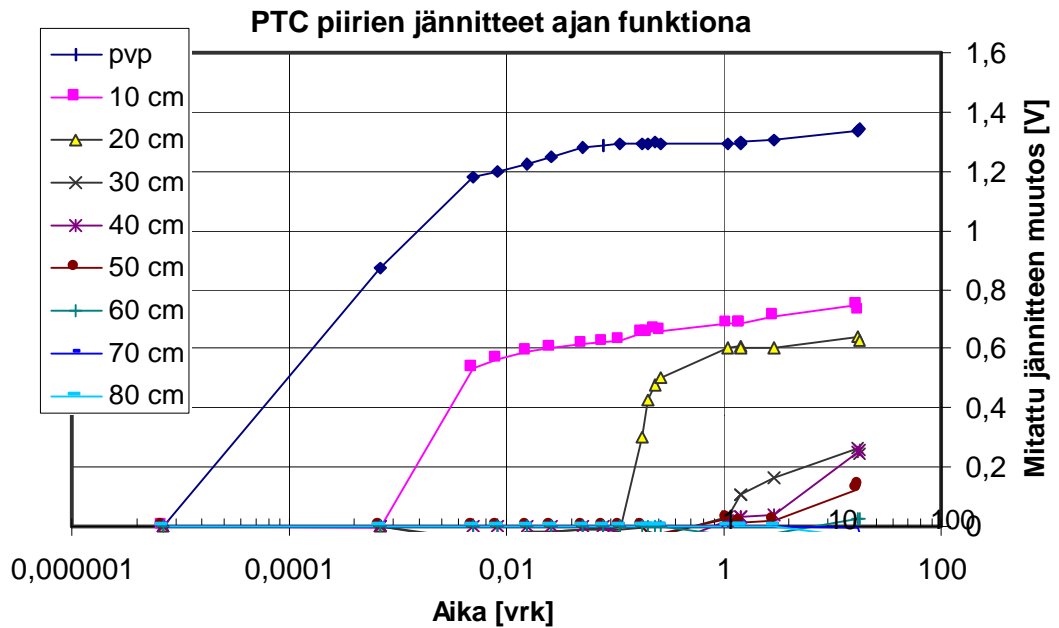
Koetilanteessa PTC-anturit ovat kosketuksissa ympäröivän maamassan kanssa. Kuivassa rakeisessa materiaalissa antureiden rajapinta koskettavat vain maarakeet ja huokosten ilma. Massan vesipitoisuuden kasvaessa ilman korvaa vesi, joka hygroskooppisesti tai kapillaarisesti siirtyy materiaalissa termistorin ympäristöön. Koska veden lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi kuin ilman, tarvitaan termistorin rajalämpötilaan lämmittämiseksi ja siellä pitämiseksi sitä suurempi jännite mitä suurempi on veden suhteellinen osuus huokosten ja termistorin välisestä rajakontaktista. Ohjealueen II salaojasorassa tehdyn kapillaarisen nousun mittauksen termistoripiireistä mitatut jännitteet vakiovirran arvolla $I = 24 \text{ A}$ on esitetty kuvassa 7.3.

Mittauskerran PTC -termistorien lukemat ajan funktiona



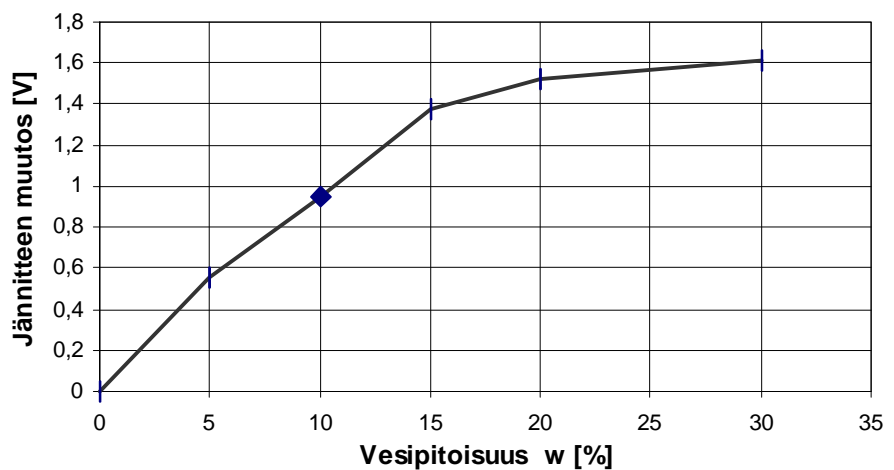
Kuva 7.3 Ohjealueen II salaojasorassa tehdyn mittauskerran termistoripiireistä mitatut jännitteet ajan funktiona. Termistorien sijoittuminen vesilähteeseen nähden alunperin kuivassa massassa on annettu korkeutena vesilähteen pinnasta (pvp).

Samasta kapillaarisesta nousukokeesta mitatut jännitteet eri termistoripiireistä termistorin tasapainotilassa on esitetty kuvassa 7.4. Jännitteen kasvu kertoo selvästi veden nousun mittaustasolle ja lisäksi veden suhteellisen määrän vähenemisen ylemmillä tasoilla verrattuna kyllästyneeseen tilaan vesilähteen pinnan tasossa (pvp). Termistoripiirin tietyllä ajanhetkellä virran kytkemisen jälkeen mitatut jännitearvot voidaan kalibroida vastaamaan materiaalin vesipitoisuuden arvoja. Ohjealueen II salaojasoran kalibrointikäyrä löyhälle materiaalille on esitetty kuvassa 7.5.



Kuva 7.4 Ohjealueen II salaojasoran kapillaarisen nousukorkeuden mittaustulokset ajan funktiona termistoripiirien tasapainotilassa 50 sekuntia virran kytkemisen jälkeen. Lukemista saadaan veden nousunopeus ja suhteellinen veden määrä huokosissa verrattuna kyllästyneeseen tilaan pohjaveden pinnan tasossa (pvp).

Ohjealueen II salaojasoran kalibrointikäyrä, löyhä sora



Kuva 7.5 Ohjealueen II salaojasoran vesipitoisuuden kalibrointikäyrä löyhälle soralle. Jännitteen arvolla 0 V materiaali on uunikuivaa.

Kehitetyllä maan lämmönjohtavuuteen ja PTC termistoreihin perustuvalla mittausmenetelmällä voidaan määrittää suhteellisen tarkasti maassa tapahtuvat vesipitoisuuden muutokset. Menetelmällä voidaan mitata huokosissa liikkuvan kapillaarisesti tai hygroskooppisesti liikkuvan vapaan veden määrää. Vesipitoisuuden absoluuttisen arvon tarkka määrittäminen menetelmän avulla riippuu materiaalin kalibroinnista ja täyttökerroksen tiivysasteen tarkasta tuntemisesta. Kalibroinnin epätarkkuuksista riippuen virhe massan absoluuttisessa kosteuspitoisuudessa voi olla $\pm 2\%$. Kalibroimattomana mitattuna saadaan selville suhteellisen tarkasti pohjaveden pinnan taso ja kosteustason muutokset yläpuolisessa maamassassa ajan funktiona.

8 Maan kosteusrasitus maanvaraisille alapohjarakenteille

Maan hygroskooppinen kosteus

Salaoja- ja täyttömateriaalit ovat aina kosteita eli lähtökohtana rakenteen toiminnan tarkastelussa tulee olla, että huokosten ilman suhteellinen kosteus RH on 100 %. Sora on rakennusvaiheessa 'maakostea' eli rakeiden välisissä huokosissa on vettä, joka voi poistua huokosrakenteesta vain haihtumalla. Toisaalta salaojasorakerros on suorassa yhteydessä pohjamaahan, jonka huokosten ilman suhteellinen kosteus on $RH = 100\%$ ja edelleen huokosverkoston kautta pohjaveteen. Lisäksi kapillaarinen kosteuden siirtyminen kuljettaa vettä alapohjarakenteen alla olevaan kerrokseen, mikäli salaojitusmateriaali ei ole riittävän karkearakeista. Suuruusluokaltaan $RH 100\%$:n suhteellista kosteutta vastaava vesimäärä yleisimmin käytetyissä salaoja- ja täyttömateriaaleissa (hiekat, sorat, sepelit) on noin 0,5 ... 1,0 paino-%:a eli 10...20 kg/m³.

Alapohjarakenteen diffuusiokäyttäytymisen kannalta määräävä on alapohjan alla olevan salaojakerroksen ja maapohjan lämpötila. Numeeristen mallinnusten mukaan rakennus lämmittää maapohjan yleensä noin +15 °C muutamassa vuodessa kun käytetään tavanomaisia tai lämmöneristettä laatassa. Yleisimmin käytetyt alapohjarakenteet toimivat tässä lämpötilassa moitteettomasti. Maan lämpötilan noustessa ylöspäin suuntautuva diffuusiovirta kasvaa. Vastaavasti riski kosteuden tiivistymiselle rakenteeseen tai yksittäisten materiaalien kriittisen kosteuspitoisuuden ylittymiselle suurenee. Rakennuksen sisälämpötilan ollessa ympäri vuoden noin +20 °C maapohjan tulee lämmitä yli +20 °C ennen kuin yleisimmin käytettyihin alapohjarakenteisiin voi tiivistyä kosteutta. Alhaisimmissa maan lämpötiloissa rakenteen yksittäisten materiaalien (esim. pinnoitteen, liimojen tai puurakenteiden) kriittinen kosteuspitoisuus voi ylittyä. Näin suuri maapohjan lämpeneminen voi tapahtua, jos maanvaraisessa laatassa ei ole lämmöneristettä, pinta-alaltaan laajan rakennuksen keskiosassa ei ole lämmöneristettä tai laatan alla maassa kulkee lämpöputkia.

Maan kapillaarinen kosteus

Vaakasuuntainen kapillaarisuus on monissa tapauksissa pystysuuntaista kapillaarisuutta selvästi voimakkaampi kosteutta täyttö- ja salaojituskerroksissa kuljettava tekijä. Karkeasti ottaen vaakasuuntaista kapillaarisuutta tapahtui kaikissa niissä materiaaleissa, joissa havaittiin myös pystysuuntaista kapillaarista nousua. Pystysuuntaisen kapillaarisuuden kosteuden siirtokapasiteetti riippuu selvästi raekokojakauman lisäksi myös rakeiden muodosta ja huokosverkoston homogeenisuudesta. Tutkituilla maamateriaaleilla korkein kapillaarinen nousukorkeus oli hiekkamoreenilla, jonka lopullinen nousukorkeus oli selvästi yli kokeessa mitatun nousun eli > 0,7 m. Fillerin (hienon hiekan) kapillaarinen nousukorkeus on noin 0,6 m ja karkean hiekan $h \approx 0,25$ m. II luokan salaojasoran oli $h \approx 0,5$ m eli korkeampi kuin karkean hiekan, koska tutkitun näytteen hienoainespitoisuus oli selvästi suurempi. Laboratoriossa pestyn I luokan salaojasoran, jonka hienoainespitoisuus oli lähes 0, kapillaarista nousukorkeutta ei voitu mitata sen pienuuden vuoksi, silmämääräisesti se oli noin 5 cm. Sepelissä ei kapillaarista nousua havaittu lainkaan. Materiaalin kapillaarisesti nostama vesimäärä riippuu materiaalin huokosluvusta. Suurimman vesimäärän vesilähteen pinnasta nosti filleri, jonka huokosluku suoritetuissa mittauksissa oli suurin $e = 0,6$ ja jossa vettä kuljettavia huokoskanavia näin ollen myös on runsaasti. Moreenin kuljettama vesimäärä on selvästi filleriä pienempi, mikä johtuu materiaalin huomattavasti pienemmästä

huokosluvusta $e \approx 0,3$. Vettä ei mahdu kulkemaan ylöspäin yhtä paljon kuin fillerissä, koska avoimia huokosia eli tilaa veden kuljettamiseen on vähemmän. Karkean hiekan ylöspäin kulkeutuvan veden määrä väheni selvästi korkeuden funktiona. Karkean hiekan huokosluku oli $e = 0,53$. II luokan salaojasoran huokosluku $e = 0,45$ oli pienempi kuin karkean hiekan, mistä syystä nousevan veden määrä oli pienempi.

Vaakasuunnassa tapahtuva veden kapillaarinen liike on täyttö- ja salaojakerroksissa, joissa materiaali on yleensä melko karkearakeista, mutta ei kuitenkaan 'pestyä', selvästi voimakkaampi ja nopein kosteutta siirtävä yksittäinen ilmiö. Tämän ilmiön osuus alapohjan ja anturarakenteiden kosteuspotentiaalini kasvattamisessa erityisesti rakennusten reuna-alueilla on yleensä kuitenkin jätetty huomiotta salaojitus- ja kuivatusrakenteita suunniteltaessa. Vaakasuuntaista kapillaarisuutta tutkittiin kapillaarisen rintaman etenemänopeuden ja siirtyvän vesimäärän suhteen. I luokan salaojasorassa ja sepelissä ei havaittu vaakasuuntaista kapillaarista veden etenemistä. Hiekoilla ja II luokan salaojasoralla ei kapillaarisessa etenemänopeudessa havaittu suuria eroja. Rintaman etenemänopeus koko tutkitun 1 m pituisen näytteen päähän asti oli noin 0,35 m/h. Hiekkamoreenissa, jossa veden liikettä hidastaa oleellisesti pienten huokosten aiheuttama virtausvastus, rintaman eteneminen oli selvästi hitaampaa kuin karkeampirakeisissa materiaaleissa. Samoin siirtyvän veden määrä oli pienempi johtuen moreenin pienemmästä huokosluvusta. Kaikkien materiaalien osalta havaittiin selvä yhteys materiaalin huokosluvun ja vaakasuuntaisesti kapillaarivoimien vaikutuksesta siirtyvän veden määrän välillä.

Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus

Tehtyjen laboratoriokokeiden ja laskennallisten analyysien perusteella voidaan maanvaraisia rakenteita vasten olevien maamassojen olettaa aina olevan kosteita. Pohjaveden pinnasta kapillaarisesti ja diffuusiolla nousevan veden lisäksi kosteuspotentiaalia maakerroksissa kasvattaa vaakasuuntaisen kapillaarisuuden kuljettamat suuret vesimäärät. Kapillaarinen veden siirtyminen voidaan estää riittävän karkearakeisella kapillaarisen liikkeen katkaisevalla maakerroksella, mikä ei kuitenkaan estä diffuusiolla tapahtuvaa kosteusvirtaa. Rakenteen toimivuus diffuusiolla tapahtuvan kosteusvirran suhteen riippuu rakenteen alla olevan maan lämpötilasta. Maapohjan lämpeneminen tulee estää lämmöneristeellä. Mikäli alapohjan alla oleva maa on lämmennyt toimiva rakenne aikaansaadaan valitsemalla lattiarakenteeksi riittävän vesihöyrynläpäisevä rakenne.

Arvioitaessa alapohjarakenteen kosteusteknistä toimivuutta on täyttö- ja salaojakerrosten vesipitoisuus ja etenkin huokosten korkea suhteellinen ilmakosteus otettava huomioon olemassa olevana reunaehtona tarkasteluille. Alapohjarakenne toimii suurimmassa osassa tapauksista moitteetta, vaikka pohjamaan vesipitoisuus olisikin suuri. Ratkaiseva tekijä on koko alapohjarakenteen toiminta kokonaisuutena vallitsevassa lämpötilakentässä siihen kohdistuvan kosteusrasituksen alaisena. Mikäli pohjamaan lämpötila ei nouse liian korkeaksi ja mikäli alapohja rakenteena pystyy haihduttamaan maasta nousevan kosteusmäärän ilman rakenteelle aiheutuvaa haittaa, ei pohjamaan kosteudesta johtuvia ongelmia pitäisi esiintyä.

Keskeisimmät lähtökohdat suunniteltaessa uusia alapohjarakenteita ja kehitettäessä alapohjarakenteiden korjausmenetelmiä ovat:

1. Maanvastaiseen rakenteeseen kosk etuksissa olevan maa -aineksen huokosilman suhteellisen kosteuden oletetaan olevan $RH = 100 \%$.
2. Maa maanvastaisen alapohjarakenteen alla ei saa lämmitä merkittävästi ylöspäin sisätilaan suuntautuvan diffuusion aiheuttaman vesihöyryn suuren kosteuspitoisuuden tai tiivistymisriskin vuoksi.
3. Maanvastaisen lattiarakenteen tulee pystyä haihduttamaan maasta mahdollisesti nouseva kosteus.

Lähdeluettelo

- ABAQUS. 1998. User's Manual. Version 5.7. Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
- Absetz, I., Viljanen, M. 1985. Kapillaarinen kosteuden siirtyminen rakenteissa. Teknillinen korkeakoulu. Rakennetekniikan laitos. Julkaisut /Report 75. Espoo.
- Adamson, A. W. 1976. Physical chemistry of Surfaces. Third edition. John Wiley & Sons, Inc. New York. Ss. 1-43.
- Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka. 2. painos. Rakennustieto Oy. 150 s.
- Day, Robert W. Moisture penetration of concrete floor slabs, basement walls and flat slab ceilings. Practice periodical on structural design and construction, Vol. 1, no. 4, November 1996, pp. 104-107.
- Hagentoft, C-E. 1988. Heat Loss to the Ground from a Building. Department of Building Technology, Lund Institute of Technology. V Report TVBH-1004. 216 s.
- Harderup, L-E. 1991. Concrete slab on the ground and moisture control. Verification of some methods to improve the moisture conditions in the foundation. Lund Institute of Technology. Doctoral dissertation. 174 s.
- Hillel, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press, Inc. 413 s.
- Hillel, Daniel. 1971. Soil and Water. Physical Principles and Processes. New York. 288 s.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Fourth edition. John Wiley & Sons Inc. New York. 886 s.
- Janz, M. 1997. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels. Lund institute of technology. Report TVBM-3076. Licentiate Thesis. 73 s.
- Johansen, O. 1973. Thermal Conductivity of Soils. Measurements and Methods of Prediction. OECD, Symposium on Frost Action on Roads. Paris, Ss. 165-188.
- Johansen, O. 1975. Thermal conductivity of soil and rock. Frost I Jord, Okt 1975. ss. 13-21.
- Kersten, M. S. 1949. Thermal properties of soils. Eng. Exp. Station. University of Minnesota. Bull. No. 28.
- Kurnitski, Jarek et al. 1998. Ryömintätilan tuuletus ja kosteuskäyttäytyminen. TKK. LVI-tekniikan laboratorio Julkaisu 59.
- Lambe, T. W., Whitman, R. V. 1979. Soil Mechanics, SI version. John Wiley & Sons, Inc. New York. 553 s.
- Landau, L. D., Lifshitz, E. M. 1966. Fluid Mechanics. Pergamon Press Ltd, Bristol. Ss. 230-237.
- Nevander L. E., Elmarsson B. 1994. Fukt handbok. Praktik och teori. Svensk Byggtjänst. Stockholm. 538 s.
- NT, Nordtest method. 1988. Relative air humidity: Calibration of electrical instruments. Nordtest. NT Build 340. 27 s.

- Palosaari, S. M. 1975. A method for the prediction of the capillary gradient coefficient in wetted porous materials. Acta polytechnica Scandinavia. Chemistry Including Metallurgy Series No. 127. Helsinki. VTT OFFSETPAINO 1975 552/1. 18 s.
- Palosaari, S. M., Cornish, A. R. H. 1975. Capillary pressure as a function of moisture content in porous materials. Acta Polytechnica Scandinavia. Chemistry Including Nuclearics Series No. 129. Helsinki. VTT OFFSETPAINO 1975 553/8. 31 s.
- Permeabilitet och kapillaritet. 1972. Bygghforskningens informationblad B7:1972. Svensk Byggtjänst. Stockholm.
- RIL 126 –1979. 1979. Rakennusten ja tonttialueiden kuivatus. Suomen rakennusinsinöörien Liitto.
- RIL 121 – 1988. 1988. Pohjarakennusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- RT 83-10444. 1991. Alapohjarakenteita. Rakennustietosäätiö. Ohjetiedosto. 17 s.
- Saarelainen, Seppo. Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model. VTT Publications 95. Technical Research Centre of Finland. Espoo 1992. 119 s.
- Sandberg, R., Pohjola, A., Viljanen, M. 1987. Maanvastaisten rakenteiden kosteuskentän laskenta hygroskooppisella alueella ja aineominaisuuksien mittaaminen. Teknillinen korkeakoulu. Rakennetekniikan laitos. Julkaisut/Report 95. Espoo.
- Siikanen, U. 1996. Rakennusfysiikka, Perusteet ja sovellukset. Rakennustieto Oy, Helsinki. 219 s.
- Suomen rakennusmääräyskokoelman osa C2. Kosteus. Määräykset ja ohjeet 1998. Ympäristöministeriö. 11 s.
- Todd, D. K. 1980. Groundwater Hydrology. Second edition. John Wiley & Sons, Inc. Ss. 1 - 55.
- Trechsel, Heinz R. 1994. Moisture Control in Buildings. ASTM Manual series: MNL 18. American Society for Testing and Materials. Philadelphia. 485 s.
- Vuorelainen, Olavi. 1960. The temperatures under houses erected immediately on the ground and the heat losses from their foundation slab. VTT julkaisu 95 (väitöskirja).
- Ympäristöopas 28. 1997. Kosteus - ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö. 143 s.
- Ympäristöopas 29. 1997. Kosteus - ja homevaurioituneen rakennuksen korjaus. Ympäristöministeriö. 79 s.

MAANVARAISTEN ALAPOHJARAKENTEIDEN KOSTEUSKÄYTTÄYTYMINEN

Julkaisu on tutkimushankekokonaisuuden Alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen ensimmäisen tutkimusvaiheen loppuraportti. Tutkimus on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun Talonrakennustekniikan ja Geotekniikan laboratorioden yhteistyönä.

Julkaisun tavoitteena on selvittää maanvaraisiin alapohjarakenteisiin pohjamaasta aiheutuvia lämpötila- ja kosteusrasituksia, joita säätelevät sekä maamateriaaliin liittyvät ominaisuudet (raekoko ja -muoto sekä tiiviys) että lämpötilan, veden- ja höyrynosapaineiden muutokset.

Maanvaraisille alapohjarakenteille ympäröivästä maasta tulevia lämpö- ja kosteusrasituksia tarkastellaan teoreettisesti kirjallisuusselvityksin, numeerisin mallinnuksin ja laskelmin. Laboratoriokokeilla on selvitetty yleisimpien luonnon täyttö- ja salaojamateriaalien tasapainokosteuskäyriä hygroskooppisella ja kapillaarisella alueella sekä määritelty kapillaarista nousunopeutta sekä pysty- että vaakasuuntaan. Lisäksi julkaisussa esitellään alapohjarakenteiden kenttäolosuhteisiin soveltuva lämpötilan ja kosteuden mittauslaitteisto.

Julkaisun hinta on 200,- + alv 8%



**TALONRAKENNUS-
TEKNIikka**

TAMPEREEN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Korkeakoulunkatu 5, PL 600, 33101 Tampere
Puh. (03) 365 4804, Telefax (03) 365 2811
Email. terttu.makipaa@tut.fi