



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

PASI WAHLFORS

TUULENSUOJA-ALUSKATERAKENTEEN SOVELTUVUUS SUOMEN ILMASTO-OLOSUHTEISIIN

Diplomityö

Tarkastajat:
professori Matti Pentti
DI Jukka Huttunen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Rakennetun ympäristön tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 17.8.2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

WAHLFORS, PASI: Tuulensuoja-aluskaterakenteen soveltuvuus Suomen ilmasto-olosuhteisiin

Diplomityö, 105 sivua, 10 liitesivua

Lokakuu 2011

Pääaine: Rakennetekniikka

Tarkastajat: professori Matti Pentti ja DI Jukka Huttunen

Avainsanat: Aluskate, vesihöyryavoin, diffuusioavoin, tuulensuoja

Eräs tapa rakentaa vino yläpohjarakenne on asentaa aluskate suoraan lämmöneristeen päälle. Tällöin rakenteen lämpötekkinen toiminta paranee, kun aluskate toimii samalla lämmöneristeen tuulensuojana. Oleellista rakenteessa on käyttää erityistä aluskatetta, joka on hyvin vesihöyryä läpäisevä. Rakenteesta käytetään nimeä tuulensuoja-aluskaterakenne. Tämänlainen rakenne ei ole tällä hetkellä Suomessa käytössä, koska Suomessa on perinteisesti tuuletusväli aluskatteen alla ja aluskatteena on yleensä vesihöyrytiivis aluskate. Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia tuulensuoja-aluskaterakenteen soveltuvuutta Suomeen ja määrittää ne tekijät, jotka mahdollisesti rajoittavat rakenteen käyttöä Suomessa.

Työ jakaantuu kolmeen osaan. Työn kirjallisuusselvitysosassa tutkitaan rakenteen käyttöä Saksassa, Sveitsissä, Isossa-Britanniassa, Tanskassa, Norjassa ja Ruotsissa. Lisäksi kirjallisuusselvitysosassa perehdytään aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin. Työn toisessa osassa tutkitaan aluskatemateriaalin vesihöyrynläpäisevyyttä tekemällä vesihöyryavoimelle aluskatteelle vesihöyrynläpäisevyyskoe viileissä (+3,7 °C) ja kylmissä (-10 °C) olosuhteissa niin sanotulla märkäkuppikokeen menetelmällä. Kolmannessa osassa rakennetta tarkastellaan rakennusfysikaalisen laskennan avulla. Laskennassa selvitetään rakenteen sisällä vallitsevat lämpö- ja kosteusolosuhteet WUFI Pro 4.2 laskentaohjelmalla. Laskentatuloksia käytetään homeen kasvun riskin arvioimiseen niin sanotulla homemallilla.

Työssä näytetään, että tuulensuoja-aluskaterakenne on käytössä muun muassa Saksassa, Sveitsissä, Tanskassa ja Norjassa. Aikaisemmin tehtyjen tutkimusten mukaan rakenne toimii kosteusteknisesti hyvin. Vesihöyrynläpäisevyyskokeen mukaan näyttäisi siltä, että aluskatteen vesihöyrynläpäisevyys ei muutu merkittävästi lämpötilan laskiessa. Lisäksi rakennusfysikaalinen laskenta näytti, että kosteus pääsee helposti poistumaan rakenteesta aluskatteen läpi ja, että riski homeenkasvulle rakenteessa on pieni. Näin ollen voidaan todeta, että rakenne soveltuu käytettäväksi myös Suomessa.

Tuulensuoja-aluskaterakenne poikkeaa tavanomaisesta suomalaisesta yläpohjarakenteesta. Niinpä sen käytön yhteydessä on muistettava muutama erityisvaatimus, jotka varmistavat rakenteen hyvän kosteusteknisen toimivuuden: 1) Tuulensuoja-aluskaterakennetta suositellaan käytettäväksi jyrkillä katoilla, joiden kaltevuus on vähintään 1:4. 2) Aluskate tulee asentaa sekä sadeveden- että ilmapitävästi. Tällä varmistetaan rakenteen hyvä kosteustekkinen toiminta sekä saavutetaan tavanomaista parempi lämmöneristävyys. 3) Aluskatteena tulee käyttää luokiteltua aluskatetta, joka on sadeveden- ja tuulenpitävä sekä samalla hyvin vesihöyryavoin (suositus $s_d \leq 0,05$ m). 4) Rakennetta voi käyttää kaikkien vesikatemateriaalien kanssa, kunhan aluskatteen ja vesikatteen välissä on hyvin tuulettuva tuuletusväli. Tuuletusvälin korkeudeksi riittää yleensä 45 mm:ä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

WAHLFORS, PASI: Suitability of a Roof structure with Combined Underlay and Wind Barrier for Finnish Climatic Conditions

Master of Science Thesis, 105 pages, 10 Appendix pages

October 2011

Major: Structural Engineering

Examiners: Professor Matti Pentti and DI Jukka Huttunen

Keywords: underlay, water vapour, diffusion open, wind barrier

One way to build a pitched roof is to install the underlay directly over the heat insulation. In that case, the underlay protects the heat insulation from the effects of cold wind. The most important thing in this type of structure is to use a special underlay material which is highly vapour-permeable. The name of the structure is “a roof structure with combined underlay and wind barrier”. This kind of roof structure is not in use in Finland because in Finland it is traditional to use a ventilation gap below the underlay. Furthermore, in Finland the underlay material is not usually vapour permeable. The main goals of this study are to investigate the suitability of such a roof structure for Finnish climatic conditions and to identify any potential problems concerning its use.

The study is divided into three parts. The first part is a survey of the current literature on the topic. The main goals are to describe whether the structure is used in Germany, Switzerland, The United Kingdom, Denmark, Norway and Sweden, and also to analyse earlier studies on the topic. The second part investigates how permeable the underlay material is to water vapour. One type of underlay material is tested in a water vapour permeability test called the ‘wet cup’ test. Tests were carried out at two different temperatures +3.7 °C and –10.2 °C. The aim of the tests was to find out whether the temperature has an effect on the water vapour permeability of the underlay material. The third part of this study investigates the moisture behaviour of the structure through calculations. The calculations are done with WUFI Pro 4.2 and the results of these calculations are used to estimate the risk of mould growth in the structure.

The study shows that the roof structure with combined underlay and wind barrier is used in, for example, Germany, Switzerland, Denmark and Norway. Earlier studies show that the structure works properly. The wet cup tests showed that there is no significant change in water vapour permeability at lower temperatures. Furthermore, the calculations showed that the moisture can easily dry out through the underlay and that the risk for mould growth is low. The conclusion is that the roof structure with combined underlay and wind barrier is also suitable for Finnish climatic conditions.

This roof structure with combined underlay and wind barrier is not in common use in Finland. So, there are a few special requirements needed to ensure that the structure exhibits the appropriate moisture behaviour. 1) The minimum pitch for the roof should be 1:4. 2) The underlay should be both rain- and air-tight, as should the underlay seams and all the roof penetrations. 3) Only underlay material that is classified and tested should be used. The most important material properties of this material are that it is both rain-tight and airtight, yet remains permeable to water vapour. The recommended level for water vapour permeability is $s_d \leq 0.05$ m. 4) There should be at least a 45 mm high ventilated air space between the underlay and the roof covering.

ALKUSANAT

Tämä on Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen diplomityö. Työlle aiheen ja kaikki tarvittavat puitteet työn tekemiseksi tarjosi Vahanen Oy. Vesi-höyrynläpäisevyyskokeeseen materiaalinäytteet tarjosi Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy. Työn ohjaajina toimivat prof. Matti Pentti ja DI Jukka Huttunen.

Kiitos Vahanen Oy:lle mielenkiintoisesta aiheesta ja työn puitteiden järjestämisestä. Kiitos ohjaajien lisäksi Pekka Laamaselle (Vahanen Oy), Jussi Jokiselle (Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy) ja Vilho Pekkalalle (Vahanen Oy) työn aikana saaduista neuvoista, vinkeistä ja työn kommentoinnista. Kiitos myös vaimolleni Päiville avusta työn oikoluvussa sekä tuesta työn aikana.

Espoossa

24.11.2011



Pasi Wahlfors

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
1.1	Tausta.....	1
1.2	Tavoitteet	1
1.3	Työn suoritus.....	1
1.4	Työn rajaukset.....	2
2	YLÄPOHJARAKENTEEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN PERUSTEET ..	3
2.1	Yleistä.....	3
2.2	Kosteuslähteet	4
2.3	Kosteuden kulkeutuminen	7
2.3.1	Diffuusio	7
2.3.2	Konvektio	9
2.4	Kondenssi.....	10
2.5	Kosteuden sitoutuminen	10
3	KRIITTISET KOSTEUS- JA LÄMPÖTILAOLOSUHTEET	12
3.1	Yleistä mikrobilajeista	12
3.2	Mikrobien kasvuolosuhteet.....	13
3.3	Homeen kasvun mallintaminen, ns. homemalli	15
3.4	Haitallisen homekasvuston määrittely.....	20
3.5	Homeen kasvun sallittu taso	20
4	YLÄPOHJARAKENNE	23
4.1	Perinteinen vino yläpohja	23
4.1.1	Tuuletuksen merkitys	26
4.2	Tuulensuoja-aluskaterakenne.....	27
4.2.1	Tuulensuoja-aluskaterakenteen hyödyt	28
4.2.2	Tuulensuoja-aluskaterakenteen kuivumiskyky	30
4.2.3	Samankaltaisuus perinteiseen rakenteeseen	30
4.2.4	Aluskatteelta vaadittavat palo-ominaisuudet	31
4.2.5	Aluskatteen materiaaliominaisuudet	31
4.2.6	Aluskatteen tiivis asentaminen	32

5	TUULENSUOJA-ALUSKATERAKENTEEN KÄYTTÖ MUISSA EUROOPAN MAISSA SEKÄ AIEMMIN TEHDYT TUTKIMUKSET	35
5.1	Ilmastolliset erot.....	35
5.2	Saksa.....	36
5.3	Sveitsi	41
5.4	Iso-Britannia.....	42
5.5	Tanska.....	45
5.6	Norja	47
5.7	Ruotsi.....	50
5.7.1	Kenttätutkimus, Porsgrunn Norja, 2000 ja 2006	51
5.7.2	Laboratoriotutkimus, 2000	52
5.7.3	Kenttätutkimus, Tukholma, 2004–2006	56
5.8	Suomi.....	58
5.9	Kattokaltevuuksien vertailua Suomi, Ruotsi ja Norja	62
5.10	Yhteenveto kirjallisuusselvityksestä	63
6	ALUSKATTEEN VESIHÖYRYNLÄPÄISEVYYSKOE.....	67
6.1	Johdanto	67
6.2	Teoria.....	67
6.3	Koejärjestely	70
6.4	Mittaustulokset ja havainnot	72
6.5	Tulosten laskenta.....	74
6.6	Virhearviointi	75
6.7	Yhteenveto vesihöyrynläpäisevyyskokeesta.....	79
7	RAKENTEEN LASKENNALLINEN TARKASTELU.....	81
7.1	Laskentamalli	81
7.2	Lähtöarvot.....	82
7.2.1	Ilmasto	82
7.2.2	Ilmansuunta ja kattokaltevuus	84
7.2.3	Laskentamallin rajaukset	84
7.2.4	Homemalli	84
7.3	Laskentatapaukset	84

7.4	Tulokset ja niiden analysointi	85
7.5	Herkkyystarkastelu	89
7.6	Kommentit laskennallisesta tarkastelusta	90
7.7	Yhteenveto laskennallisesta tarkastelusta.....	91
8	YHTEENVETO.....	93
8.1	Tutkimuksen kulku ja tulokset	93
8.2	Suositukset tuulensuoja-aluskaterakenteen käytölle	95
8.3	Keskustelu ja jatkokehitystarve.....	98
8.4	Johtopäätökset	99
	LÄHTEET	101
LIITE 1	Kosteusvirran tiheys ajan suhteen – kaikki mittapisteet.....	1
LIITE 2	Dataloggereiden kalibrointi.....	2
LIITE 3	Tuuletusvälin mallintaminen WUFI:lla	3
LIITE 4	Vesikatteen ja tuuletusvälin vaikutus homeindeksiin.....	4
LIITE 5	Homeindeksin vertailu Helsingin, Jyväskylän ja Sodankylän säätiedoilla...	5
LIITE 6	Pinnan siirtokertoimet.....	6
LIITE 7	Ulkoilman ja vertailurakenteen kosteuspitoisuus.....	7
LIITE 8	Lyhytaaltoisen absorptiokertoimen vaikutus homeindeksiin.....	8
LIITE 9	Ulkopinnan lämmönsiirtokertoimen vaikutus homeindeksiin	9
LIITE 10	Höyrynsulun puuttumisen vaikutus homeindeksiin	10

MERKINNÄT

$\Delta\varphi$	suhteellisen kosteuden muutos	%
Δv	kosteuspitoisuusero	kg/m ³
$\Delta v_{\text{ilmatila}}$	vesihöyrypitoisuusero mittapään ja aluskatteen alapinnan välillä	kg/m ³
Δm	painon muutos	kg
Δp_v	vesihöyryn osapaine-ero	Pa
Δt	ajan muutos	s
Δx	diffuusiomatka	m
Δx	kokonaisvirhe	m
δv	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyrypitoisuuden avulla laskettuna)	(kg/m·s)/(kg/m ³) = m ² /s
δp	vesihöyrynläpäisevyys (vesihöyryn osapaineen avulla laskettuna)	kg/m·s·Pa
φ_s	koekupin sisäpuolinen suhteellinen kosteus, jossa on otettu huomioon ilmatilan aiheuttama suhteellisen kosteuden alenema	%
φ_u	koekupin ulkopuolinen suhteellinen kosteus	%
v	vesihöyrypitoisuus	kg/m ³
v_s	sisäilman vesihöyrypitoisuus	kg/m ³
v_u	ulkoilman vesihöyrypitoisuus	kg/m ³
A	pinta-ala	m ²
A, B ja C	materiaalista riippuvat kertoimet	-
C_{mat}	materiaalikohtainen kerroin homeen taantumanopeudelle	-
d	ainekerroksen paksuus	m
dM/dt	homeen kasvu aikayksikössä	-
dM_o/dt_{mat}	homeindeksin taantumanopeus kussakin materiaalissa	-
dM_o/dt_0	homeindeksin taantumanopeus männyn pintapuussa	-
G	kosteuden tuotto	kg/h
G	kosteusvirta aikayksikössä	kg/s
g	kosteusvirran tiheys	kg/s·m ²

k_1	homeen kasvunopeus	-
k_2	homeindeksin hidastumisen kerroin	-
M	homeindeksi	-
M	molekyylipaino	kg/mol
M_v	vesihöyryn molekyylipaino (18,02)	kg/mol
m_x	s_d -arvon keskiarvon keskivirhe mittaustuloksista laskettuna	m
m'_x	s_d -arvon virhe, jossa on laskettu yhteen mittalaitteiden epätarkkuuden virhe ja mittapään sijoittamisen epätarkkuus	m
n	ilman vaihtuvuus aikayksikössä	1/h
p	paine	Pa
p_v	vesihöyryn osapaine	Pa
p_k	vesihöyryn osapaine kyllästyskosteudessa	Pa
R	yleinen kaasuvakio	J/mol·K
RH	suhteellinen kosteus	%
RH_{min}	suhteellisen kosteuden minimiarvo	%
RH_{crit}	suhteellisen kosteuden kriittinen arvo	%
s_d	ekvivalentti ilmakerroksen paksuus	m
SQ	pinnan ravinteikkuuden kerroin	-
T	lämpötila	°K tai °C
t	lämpötila	°C
t	aika	s tai h
V	tilavuus	m ³
W	puulajikohtainen kerroin	-
W_v	vesihöyrynläpäisykerroin (vesihöyrypitoisuuden avulla laskettuna)	m/s
W_p	vesihöyrynläpäisykerroin (vesihöyryn osapaineen avulla laskettuna)	kg/m ² ·s·Pa
Z_v	vesihöyryn vastus (vesihöyrypitoisuuden avulla laskettuna)	s/m
Z_p	vesihöyryn vastus (vesihöyryn osapaineen avulla laskettuna)	m ² ·s·Pa/kg

KÄSITTEITÄ

Aluskate	Vesikatteen alapuolinen ainekerros, joka estää katteen saumojen tai reunojen kautta mahdollisesti tunkeutuvan veden tai lumen sekä kondenssiveden pääsyn yläpohjaan ja jota pitkin vesi valuu ulkoseinälinjan ulkopuolelle.
Diffuusio	Kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiossa kaasumolekyylit siirtyvät korkeammasta pitoisuudesta pienempään.
Diffuusioavoin aluskate	Aluskate, joka päästää vesihöyryn hyvin lävitseen.
Hygroσκοoppisuus	Tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Höyrynsulku	Tarkoittaa ainekerrosta, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen vesihöyryn diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa.
Ilmansulku	Tarkoittaa ainekerrosta, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi puolelta toiselle.
Kosteusvirran tiheys	Tarkoittaa tietyn pinnan tai tason lävitse aikayksikössä tapahtuvaa kosteuden siirtymistä. Tavallisesti yksikkönä on $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$.
Diffuusio	Kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiossa kaasumolekyylit siirtyvät korkeammasta pitoisuudesta pienempään.
Konvektio	Konvektio on lämmön kulkeutumista nesteessä tai kaasussa lämmön tai paine-erojen aiheuttamien virtausten mukana.
Kondensoituminen	Kondensoituminen tarkoittaa ilmassa olevan vesihöyryn tiivistymistä rakenteen pintoihin vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut pinnan lähellä kylästyskosteuden (100 % RH).
Perinteinen rakenne	Tarkoittaa tässä työssä kattorakennetta, jossa aluskatteen alapuolella on ulkoilmalla tuuletettu tila tai väli.
S_d -arvo	Materiaalin suhteellinen vesihöyrynvastus, joka ilmoitetaan ekvivalenttina ilmakerroksen paksuutena. S_d -arvo ilmaisee kuinka paksua ilmakerrosta materiaalikerroksen vesihöyrynvastus vastaa.

Suhteellinen kosteus	Ilmoittaa kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä verrattuna kyllästyskosteuspitoisuuteen tietyssä lämpötilassa. Ilmoitetaan tavallisesti prosentteina.
Tuulensuoja	Rakennusosassa oleva ainekerros, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen ilmavirtaus ulkopuolelta sisäpuoliseen rakenteen osaan ja takaisin
Tuulensuoja-aluskaterakenne	Tarkoittaa tässä työssä tutkittavaa yläpohjarakennetta, jossa aluskatteen alapuolella ei ole tuuletettua tilaa tai väliä. Aluskatteena tässä rakenteessa on hyvin vesihöyryä läpäisevä aluskate.
Tuuletusaukko tai –rako	Tarkoittaa ulkopuolelta rakenteen tuuletusväliin tai –tilaan johtavaa tuuletusilmavirran sisäänmeno- tai poistumisaukkoa tai –rakoa.
Tuuletustila	Tarkoittaa rakenteessa olevaa yhtenäistä ilmatilaa, jonka kautta rakennetta tuulettava ilmavirtaus kulkee ja jonka korkeus tai paksuus ilmavirran suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa on vähintään 200 mm.
Tuuletusväli	Tarkoittaa rakenteessa olevaa yhtenäistä ilmapäliä, jonka kautta rakennetta tuulettava ilmavirtaus kulkee ja jonka korkeus tai paksuus ilmavirran suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa on enintään 200 mm.
Ullakkotilallinen yläpohja	Tarkoittaa tässä työssä yläpohjaa, jossa on kylmä ullakkotila ylimmän asuinkerroksen yläpuolella.
Vino yläpohja	Tarkoittaa tässä työssä yläpohjaa, jossa sisäkatto on kattolapteen suuntainen.
Vesihöyryavoin aluskate	Sama kuin diffuusioavoin aluskate.
Vesihöyrynläpäisevyys	Ilmoittaa sen vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suuruinen. Merkitään δ_v tai δ_p . Yksikköinä käytetään $\delta_v = [\text{m}^2/\text{s}]$ ja $\delta_p = [\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}]$.
Vesihöyrynläpäisykerroin	Ilmoittaa sen vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen rakenneosan, kun rakenneosan eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien ero (tai vesihöyryn osapaine-ero) on yksikön suu-

	ruinen). Merkitään W_v tai W_p . Yksikköinä käytetään $W_v = [m/s]$ ja $W_p = [kg/m^2 \cdot s \cdot Pa]$
Vesihöyrynvastus	Tarkoittaa vesihöyrynläpäisykertoimen käänteisarvoa. Merkitään Z_v tai Z_p . Yksikköinä käytetään $Z_v = [s/m]$ ja $Z_p = [m^2 \cdot s \cdot Pa/kg]$
Vesihöyrypitoisuus	Ilman sisältämä vesihöyrypitoisuus v ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyrymäärän vesihöyrypitoisuutena $[kg/m^3]$. Vesihöyrypitoisuus p_v ilmoittaa vesihöyrypitoisuuden vesihöyryn osapaineena $[Pa]$.
Vesihöyryn konvektio	Tarkoittaa kaasuseoksen (esimerkiksi ilma) sisältämän vesihöyry siirtymistä kaasuseoksen mukana sen liikkuesssa kokonaispaine-eron vaikutuksesta.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Kokonaan uusia tai uudentyypisiä rakenteita tulee Suomessa harvoin laajasti yleiseen käyttöön. Jotta uusi tai uudentyypinen rakenne kannattaisi tehdä vanhan tutun rakenteen sijaan, niin rakenteen käytöllä tulee saavuttaa jotain konkreettista hyötyä. Parempi lämmöneristävyys tai pienempi rakennepaksaus ovat hyötyjä, joiden ansiosta uudentyypinen rakenne on kannattavaa tehdä perinteisen rakenteen sijaan. Uudentyypinen rakenne vaatii kuitenkin aina selkeää näyttöä sen turvallisesta toiminnasta ennen kuin sitä voidaan suositella käytettäväksi. Selkeää näyttöä rakenteen turvallisesta toiminnasta saadaan teoreettisista tutkimuksista, laboratorio- ja kenttätutkimuksista sekä aikaisemmista käyttökokemuksista.

Tässä työssä tutkittava tuulensuoja-aluskaterakenne on käytössä Keski-Euroopassa, mutta rakenteen soveltuvuudesta Suomen ilmasto-olosuhteisiin ei ole tällä hetkellä saatavilla riittävää tietoa. Rakenteen oleellinen osa on aluskate, joka on hyvin vesihöyryavoin, mutta samalla sadeveden- ja tuulenpitävä. Tällaisia aluskatteita on ollut markkinoilla vasta noin 20 vuotta, joten rakenne on Keski-Euroopassakin verrattain uusi.

Tämän työn taustalla on siis tilanne, jossa uudentyypinen rakenne on rantautumassa Suomeen ja tarvitaan selkeää näyttöä sen kosteusteknisesti turvallisesta toiminnasta.

1.2 Tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia Suomessa uudentyypisen yläpohjarakenteen, tuulensuoja-aluskaterakenteen, soveltuvuutta Suomen ilmasto-olosuhteisiin sekä Suomessa rakennettaville tyypillisimmille kattotyypeille. Lisäksi työn tavoitteena on määrittää ne mahdolliset tekijät, jotka rajoittavat rakenteen käyttöä Suomessa. Näitä voivat olla muun muassa kattokaltevuus, vesikatemateriaalit, tuuletusvälin korkeus ja rakenteen sisäpuolella käytettävä höyrynsulkumateriaali.

1.3 Työn suoritus

Rakenteen kosteusteknisen toiminnan arvioiminen edellyttää kosteuteen liittyvän teorian tuntemista, mihin liittyy kosteuslähteet, kosteuden kulkeutuminen rakenteessa ja kosteuden mahdollinen kerääntyminen rakenteeseen. Tämän lisäksi tulee tuntea rakenne ja sen tärkeimpien rakennusmateriaalien kosteuteen liittyvät ominaisuudet. Näiden tietojen avulla pystytään arvioimaan kosteuden kulkeutumista rakenteessa ja sen kerääntymistä rakenteeseen. Rakenteen toimivuuden arvioinnissa oleellista on lisäksi tuntea ne olosuh-

teet, jotka ovat kriittiset rakenteen vaurioitumisen kannalta. Puurakenteissa kriittisiin olosuhteisiin liittyy läheisesti erilaiset mikrobit ja niiden kasvuolosuhteet.

Rakenteen soveltuvuuden tarkastelussa keskitytään tutkimaan rakenteen kosteusteknistä toimintaa kirjallisuusselvityksen, aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyskokeen ja rakennusfysikaalisen laskennan avulla. Kirjallisuusselvityksessä tutkitaan rakenteen käyttöä Saksassa, Sveitsissä, Iso-Britanniassa, Tanskassa, Norjassa ja Ruotsissa. Selvityksessä tutkitaan onko rakenne käytössä näissä maissa ja mitä tutkimuksia rakenteelle on aikaisemmin tehty.

Aluskatemateriaalille tehtävällä vesihöyrynläpäisevyyskokeella tutkitaan aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyttä viileissä ja kylmissä olosuhteissa. Kokeen avulla selvitetään muuttuuko aluskatteen vesihöyrynläpäisevyys lämpötilan mukaan.

Rakennusfysikaalisella laskennalla määritetään rakenteen sisällä olevat kosteus- ja lämpöolosuhteet, joiden avulla lasketaan rakenteelle homeen kasvun riskiä kuvaava homeindeksi. Homeindeksin perusteella saadaan käsitys rakenteen toimivuudesta vaihtelevissa ilmasto-olosuhteissa.

1.4 Työn rajaukset

Tutkittava rakenne on tuulensuoja-aluskaterakenne, jota käytetään tyypillisesti jyrkillä katoilla. Tässä työssä rajoitutaan käsittelemään jyrkkiä kattoja, joiden runkorakenne on puuta ja lämmöneristys on mineraalivillaa. Tutkittava rakenne on esitetty tarkemmin kappaleessa 4.2. Työssä keskitytään rakenteen kosteustekniseen toimivuuteen, jolloin rakenteen lämpöteknisen toiminnan tarkastelu jätetään vähemmälle huomiolle. Rakenteen lämpöteknistä toimintaa ja rakenteen energiansäästöpotentiaalia on kuvattu tarkemmin tämän työn lähteissä.

Rakenne mallinnetaan laskentaa varten ideaalisesti, jolloin ei pyritä ottamaan huomioon käytännössä rakenteisiin tulevia epäideaalisuuksia, kuten ilma tai vesivuotoja. Nämä otetaan huomioon erikseen testattavilla laskentamalleilla.

Tässä tutkimuksessa ei suunnitella rakenteen yksityiskohtaisia rakennetyyppejä tai muita kattorakenteen yksityiskohtia. Rakenteen soveltuvuuden tarkastelussa pyritään ottamaan yksityiskohdat huomioon kosteusteknisen toiminnan kannalta riittävällä tarkkuudella. Yksityiskohtaisia detaljipiirustuksia ja esimerkkiratkaisuja löytyy työssä käytetyistä lähteistä.

2 YLÄPOHJARAKENTEEN KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN PERUSTEET

2.1 Yleistä

Vesi voi esiintyä eri olomuodoissa. Se voi esiintyä kiinteänä eli jäänä tai lumena, nesteenä eli vetenä tai kaasuna eli vesihöyrynä. Ilmassa kosteus on vesihöyrynä. Kosteaa ilmaa on kuivan ilman ja vesihöyryn seos [1]. Ilman vesihöyrypitoisuus v kertoo kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä (kg/m^3). Vesihöyrypitoisuus ilmassa voidaan johtaa ideaalikaasun yhtälöstä

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (1)$$

p = kaasun paine (Pa)

V = kaasun tilavuus (m^3)

m = kaasun massa (kg)

M = kaasun molekyylipaino (kg/mol)

R = yleinen kaasuvakio 8314,3 (J/kmol $^\circ\text{K}$)

T = lämpötila ($^\circ\text{K}$)

Kaasun tiheys voidaan esittää yhtälöstä kaavalla

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (2)$$

Kaasuseoksessa kaasun tiheyden yhtälö pätee kullekin kaasulle erikseen, jolloin vesihöyryn tiheys v (kg/m^3) eli vesihöyrypitoisuus voidaan esittää kaavalla

$$v = \frac{p_v \cdot M_v}{R \cdot T} \quad (3)$$

p_v = vesihöyryn osapaine (Pa)

M_v = vesihöyryn molekyylipaino 18,02 (kg/mol)

Tietyissä lämpötilassa ilma voi sisältää vain tietyn määrän vesihöyryä. Kun vesihöyryä on ilmassa suurin mahdollinen määrä, niin on saavutettu ilman kyllästyskosteus v_k , eli niin sanottu kastepiste. Se, miten paljon ilmaan mahtuu vesihöyryä, riippuu ilman lämpötilasta. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä enemmän vesihöyryä siihen mahtuu. Vesihöyrypitoisuus eri lämpötiloissa voidaan laskea likiarvokaavoilla. Kaavoja on esitetty

eri lähteissä useita erilaisia [1]. Lähteessä [2] kyllästyskosteus lämpötila-alueella $-20\text{ °C} \dots +25\text{ °C}$ esitetään kaavalla

$$v_k = \frac{1,32 \cdot (1 + 0,02 \cdot t)^4}{t + 273} \quad (4)$$

t = lämpötila (°C)

ja lämpötila-alueella $-20\text{ °C} \dots +80\text{ °C}$ kyllästyskosteus voidaan esittää kaavalla

$$v_k = 10^{-3} \left[4,85 + 3,47 \left(\frac{t}{10} \right) + 0,945 \left(\frac{t}{10} \right)^2 + 0,158 \left(\frac{t}{10} \right)^3 + 0,0281 \left(\frac{t}{10} \right)^4 \right] \quad (5)$$

Ilman suhteellinen kosteus RH (Relative Humidity, %) kertoo ilman vesihöyrypitoisuuden suhteessa vesihöyrypitoisuuden kyllästyskosteudessa. RH 100 % tarkoittaa kyllästyskosteutta tietyssä lämpötilassa. Suhteellinen kosteus voidaan esittää vesihöyrypitoisuuksien suhteena

$$RH = \frac{v}{v_k} \quad (6)$$

tai vesihöyrynsapaineiden suhteena

$$RH = \frac{p_v}{p_k} \quad (7)$$

2.2 Kosteuslähteet

Yläpohjarakenteen kosteuslähteitä ovat ulkopuolelta tuleva sade, ulkoilman kosteus, sisäpuolelta tuleva sisäilman kosteus sekä rakennekosteus. **Sade** voi tulla vetenä, lumena tai jäänä. Se voi olla pystysuoraa sadetta tai viistosadetta. Eniten sadetta tulee syksyisin. Viistosateen määrä on noin 20–30 % pystysuoran sateen määrästä ja siitä noin puolet sataa syksyisin. Vuotuinen sademäärä on Suomessa noin 600 mm vettä ja se vaihtelee maantieteellisen sijainnin mukaan. Suurimmat rankkasademäärät vuorokautena ovat olleet luokkaa 60–120 mm. [1]

Yläpohjarakenteen ulko-osissa (esimerkiksi tuuletusvälissä) ilman kosteuspitoisuus on yhtä suuri kuin **ulkoilman kosteuspitoisuus**, joka vaihtelee huomattavasti vuodenaikojen mukaan. Taulukossa (Taulukko 1) on esitetty kuukausien keskiarvotietoja ulkoilman kosteudesta eräillä paikkakunnilla Suomessa.

Taulukko 1: Ulkoilman kosteus- ja lämpötilatietoja kuukauden keskiarvoina eräillä paikkakunnilla Suomessa.[1]

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Helsinki	t (°C)	-6,1	-6,6	-3,5	2,6	8,9	14,0	17,2	16,0	11,1	5,4	1,0	-2,6
	RH (%)	88	87	82	76	66	64	71	78	84	86	89	89
	p (Pa)	331	314	382	563	757	1025	1394	1420	1115	777	586	446
	v (g/m ³)	2,69	2,55	3,07	4,42	5,82	7,74	10,41	10,65	8,51	6,04	4,64	3,57
Turku	t	-6,0	-6,6	-3,6	2,2	8,7	13,9	17,1	15,7	10,6	5,2	0,9	-2,7
	RH	89	88	82	76	67	65	71	77	84	87	90	90
	p	337	317	379	546	758	1035	1386	1375	1079	775	588	447
	v	2,74	2,58	3,05	4,30	5,83	7,82	10,35	10,33	8,25	6,03	4,66	3,58
Jyväskylä	t	-8,8	-8,7	-4,8	2,0	8,7	13,9	16,9	15,0	9,8	3,8	-0,8	-5,0
	RH	89	87	81	75	68	65	72	80	86	88	91	90
	p	265	261	339	531	769	1035	1388	1366	1047	710	523	371
	v	2,17	2,14	2,74	4,19	5,92	7,82	10,37	10,29	8,03	5,56	4,17	3,00
Vaasa	t	-6,7	-6,9	-4,2	1,5	7,6	13,0	16,5	15,0	10,1	4,4	-0,1	-3,3
	RH	80	87	83	78	69	67	72	79	84	87	89	89
	p	282	305	365	533	725	1006	1353	1349	1044	733	540	422
	v	2,33	2,49	2,94	4,29	5,60	7,62	10,13	10,16	7,99	5,72	4,29	4,69
Kajaani	t	-10,6	-10,6	-6,7	0,4	6,9	13,0	16,1	14,0	8,3	2,1	-2,6	-7,0
	RH	86	85	81	75	67	66	69	78	84	87	90	88
	p	216	214	286	472	671	991	1264	1250	925	621	451	306
	v	1,79	1,77	2,36	3,75	5,19	7,51	9,48	9,44	7,13	4,89	3,61	2,50
Sodankylä	t	-13,5	-13,5	-8,9	-2,2	4,8	11,3	14,7	12,0	6,2	-0,5	-5,8	-9,8
	RH	85	83	80	73	67	65	69	78	84	88	89	89
	p	162	158	236	377	580	874	1157	1098	802	518	343	241
	v	1,36	1,32	1,94	3,01	4,52	6,67	8,72	8,35	6,22	4,12	2,79	1,99

Taulukosta nähdään, että suhteellinen kosteus on suurin talvella, kun lämpötila on alhainen eikä ilmaan mahdu paljoa kosteutta. Kesällä ulkoilman suhteellinen kosteus on alhainen, mutta korkeamman lämpötilan johdosta ilmassa on noin viisi kertaa enemmän vesihöyryä kuin talvella [1]. Ilman kosteuspitoisuudet ovat suurimpia syksyisin, jolloin ulkoilma on pitkään lämmintä ja kostea.

Sisäilmassa on kosteutta yleensä vähintään saman verran kuin ulkoilmassa, koska rakennukseen tuleva tuloilma otetaan ulkoa. Ulkopuolisen ilmankosteuden lisäksi sisäilmassa on ylimääräistä kosteutta ulkoilmaan nähden, mitä sanotaan kosteuslisäksi. Kosteuslisä on peräisin rakennuksessa olevista ihmisistä ja eläimistä sekä erilaisista toiminnoista, kuten ruoan laitosta, pyykin pesusta ja kylpemisestä. Näiden aiheuttamaa kosteustuoton määrää on esitetty taulukossa (Taulukko 2). Kosteus siirtyy kosteuslähteistä sisäilmaan haihtumalla. Sisäilman kosteuspitoisuus riippuu rakennuksen sisäpuolisten kosteuslähteiden lisäksi ilmanvaihdon suuruudesta ja se voidaan laskea kaavalla [1]

$$v_s = v_u + \frac{G}{n \cdot V} \quad (8)$$

v_s = sisäilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

v_u = ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)

G = kosteuden tuotto sisällä (kg/h)

n = ilman vaihtuvuus aikayksikössä (1/h)

V tuuletetun huoneen tilavuus (m^3)

Jos ilma ei vaihdu tehokkaasti, niin ilmaan ehtii kertyä kosteuslähteistä enemmän kosteutta kuin siinä tapauksessa, että ilma vaihtuisi tehokkaasti. Esimerkiksi jos ilmanvaihto pienennetään puoleen, niin silloin sisäilmaan ehtii kerääntyä kosteutta ajallisesti kaksi kertaa pidempään. Tämä tarkoittaa, että sisäilman kosteuslisän arvo kaksinkertaistuu. Ilmanvaihdon puutteellisuus lisää näin selvästi sisäilman kosteuspitoisuutta.

Taulukko 2: Eri kosteuslähteiden kosteuden tuotto asuinrakennuksissa. [3]

Kosteuslähde	Tuotto
Ihminen	40 - 300 g/h riippuen aktiiviteetista (keskimäärin 90 g/h)
Kylpy	700 g/h
Suihku	2600 g/h
Keittiötoiminta	600 - 1500 g/h (päivittäinen keskiarvo noin 100 g/h)
Avoin vesipinta	40 g/m ² h
Kasvit	
- pienet kasvit	7 - 15 g/h
- keskikokoiset	10 - 20 g/h (esim. Ficus elastica)
Vaatteiden pesu ja kuivaus	
- lingottu pyykki	10 - 50 g/h /kg, kuivaa pyykkiä
- vettä tippuva	20 - 100 g/h /kg, kuivaa pyykkiä
Kuivauksen kesto ja kokonaiskosteus otettava huomioon	

Kirjallisuudessa on esitetty kosteuslisälle tyypillisiä arvoja. Ne kuitenkin vaihtelevat paljon riippuen käytetystä lähteestä. Lähteessä [3] on käytetty kosteuslisän arvona 4 g/m^3 , joka on tyypillinen sisäilman kosteuslisän arvo kaksilapsisessa perheessä. Tämä vastaa kosteustuottoa 14 kg/d (600 g/h) [3]. Samansuuruista kosteuslisän arvoa suositellaan käytettäväksi talvisin myös lähteessä [4]. Kosteuslisä voi olla huomattavasti suurempikin, esimerkiksi silloin, kun käytetään keinotekoista sisäilman kostutusta. Sisäilman kosteuslisän suuruus arvioidaan rakennusfysikaalisessa laskennassa aina tapauskohtaisesti.

Kosteuslisän määrä ei ole todellisuudessa tasainen vaan hyvinkin vaihteleva sekä ajan että paikan suhteen ja lisäksi se riippuu paljon rakennuksen käyttäjistä. Talvella sisäilman kosteuslisä on suurempi kuin kesällä. Tämä johtuu siitä, että talvella ulkoilman kosteuspitoisuus on alhainen ja kesällä korkea. Lisäksi kosteuslisässä voi olla vaihtelua ajallisesti että huonekohtaisesti riippuen rakennuksen tilojen käytöstä. Esimerkiksi asuinrakennuksen olohuoneessa oleskellaan enimmäkseen vain iltapäivästä iltaan ja keittiössä ruokaa tehdään vain muutaman kerran päivässä.

Rakennekosteutta voi jäädä kattorakenteisiin rakennuksen valmistuttua. Sen määrä vaihtelee paljon riippuen käytetyistä rakennusmateriaaleista, rakennusmateriaalien kul-

jetuksesta ja varastoinnista sekä rakenteiden rakennusaikaisesta suojauksesta. Rakennekosteus on se vesimäärä, joka poistuu rakenteesta ennen kuin rakenne on kosteustasapainossa ympäristönsä kanssa [1].

2.3 Kosteuden kulkeutuminen

Kosteus voi liikkua vapaana vetenä, lumena tai vesihöyrynä. Kosteutta voi kulkeutua rakenteen sisään rakennuksen ulkopuolelta lähinnä sateen, mutta myös ulkoilman kosteuden mukana. Sadevesi on vapaata vettä, joka liikkuu ulkoisen voiman, kuten painovoiman tai tuulen vaikutuksesta. Kovalla vesisateella tai tuiskuavalla lumisateella vettä tai lunta voi päästä rakenteen sisään esimerkiksi tuuletusraoista. Erityisen helposti vesi pääsee vesikatteen alle silloin, kun vesi on paineellista. Vesi voi olla paineellista esimerkiksi sateella, kun vesikatteen pinnalla on paljon vettä ja tuuli painaa sitä vesikatteen pintaa vasten. Paineellista vettä muodostuu myös silloin, kun katolla on jäätä, joka synnyttää padotustilanteen ja vesi jää seisomaan. Jäätä voi muodostua esimerkiksi silloin, kun katolla sulanut lumi jäätyy räystäälle muodostaen jääpuikkoja. Kuvassa (Kuva 1) on esitetty jään muodostama padotustilanne katolla.



Kuva 1: Jääpuikkojen muodostumista räystäällä (alkuperäinen kuva lähteestä [2]).

2.3.1 Diffuusio

Rakennuksen sisältä kosteutta voi tulla yläpohjarakenteeseen lähinnä sisäilman kosteudesta, jolloin kosteus on vesihöyrynä. Vesihöyry voi kulkeutua yläpohjarakenteeseen pääasiassa ilman mukana konvektiolla tai rakenteiden läpi diffuusiolla. Diffuusiolla vesihöyry voi kulkeutua rakenteiden läpi suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta pienempään. Diffuusiolla materiaalin läpi siirtyvän kosteuden määrä g ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$) voidaan laskea joko vesihöyrypitoisuuksien avulla kaavalla [1]

$$g = \delta_v \cdot \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad (9)$$

δ_v = vesihöyryn läpäisevyys [(kg/m·s)/(kg/m³) = (m²/s)]

Δv = kosteuspitoisuusero matkalla x (kg/m³)

Δx = diffuusiomatka (m)

tai vesihöyrynosapaineiden avulla kaavalla [1]

$$g = \delta_p \cdot \frac{\Delta p_v}{\Delta x} \quad (10)$$

δ_p = vesihöyryn läpäisevyys (kg/m·s·Pa)

Δp_v = vesihöyryn osapaineen ero matkalla x (Pa)

Vesihöyrynläpäisevyysarvojen δ_v ja δ_p välillä vallitsee yhteys

$$\delta_v = 461,4 \cdot (273 + t) \cdot \delta_p \quad (11)$$

t = lämpötila (°C)

Esimerkiksi +20 °C lämpötilassa

$$\delta_v = 461,4 \cdot (273 + 20) \cdot \delta_p = 135,2 \cdot 10^3 \cdot \delta_p \quad (12)$$

Materiaalikerroksen vesihöyrynvastus Z_v (s/m) lasketaan vesihöyrypitoisuuksien avulla kaavalla [1]

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (13)$$

d = homogeenisen ainekerroksen paksuus (m)

Vesihöyrynvastus Z_p (m²·s·Pa/kg) lasketaan vesihöyryn osapaineiden avulla kaavalla

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \quad (14)$$

Vesihöyrynvastuksen käänteisluku on nimeltään vesihöyrynläpäisevyyskerroin, joka voidaan esittää vesihöyrypitoisuuksien avulla W_v (m/s) tai vesihöyryn osapaineiden avulla W_p (kg/m²·s·Pa). Ei ole kuitenkaan mielekäästä laskea vesihöyrynläpäisevyyksiä tai vesihöyrynvastuksia ohuille kalvoille, joiden paksuus on enintään muutamia millimetrejä, kaavoilla (13) ja (14). Näille voidaan vesihöyrynvastus määrittää erikseen esimerkiksi vesihöyrynläpäisevyydestillä.

Eräs havainnollinen suure kuvaamaan materiaalikerroksen vesihöyrynläpäisevyyttä / -vastusta on ilmoittaa vesihöyrynläpäisevyys ekvivalenttina ilmakerroksen paksuutena, eli niin sanottuna s_d -arvona. s_d -arvo (m) kertoo kuinka paksun ilmakerroksen vesihöyrynvastusta jokin materiaalikerros, esimerkiksi aluskatemateriaali, vastaa. Materiaalikerroksen s_d -arvo voidaan määrittää, kun tiedetään sen vesihöyrynvastus Z ja ilman

vesihöyrynläpäisevyys δ_{v_ilma} . Ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaineen suhteen δ_p voidaan laskea kaavalla [1]

$$\delta_p = (164,2 + 1,04 \cdot t) \cdot 10^{-12} \quad (15)$$

Yhdistämällä kaavat (12) ja (15) voidaan ilman vesihöyrynläpäisevyys laskea kaavalla

$$\delta_{v_ilma} = 135,2 \cdot 10^3 \cdot (164,2 + 1,04 \cdot t) \cdot 10^{-12} \quad (16)$$

Esimerkiksi +20 °C lämpötilassa ilman vesihöyrynläpäisevyys on

$$\delta_{v_ilma} = 135,2 \cdot 10^3 \cdot (164,2 + 1,04 \cdot 20) \cdot 10^{-12} = 25 \cdot 10^{-6} (m^2 / s) \quad (17)$$

Ekvivalentti ilmakerroksen paksuus voidaan nyt laskea kaavasta (13), jos tiedetään materiaalin vesihöyrynvastus Z_v . Sijoittamalla kaavaan (13) vesihöyrynläpäisevyyden arvoksi ilman vesihöyrynläpäisevyyden arvo δ_{v_ilma} saadaan s_d -arvolle kaava

$$s_d = Z_v \cdot \delta_{v_ilma} \quad (18)$$

Taulukossa (Taulukko 3) esitetään vertailun vuoksi eräiden rakennusmateriaalien s_d -arvoja.

Taulukko 3: Eräiden rakennusmateriaalien suuntaa antavia s_d -arvoja

<i>Aine</i>	<i>Paksuus</i>	<i>S_d-arvo</i>	<i>Lähde</i>
<i>Kipsilevy</i>	<i>13 mm</i>	<i>n. 0,09 m</i>	<i>[5]</i>
<i>Kova puukuitulevy</i>	<i>3,5 mm</i>	<i>0,28 m</i>	<i>[5]</i>
<i>Höyrynsulku (polyeteeni)</i>	<i>0,2 mm</i>	<i>92 m</i>	<i>[5]</i>
<i>Bitumikermi (BTL 2)</i>	-	<i>277 m</i>	<i>[5]</i>
<i>Puu</i>	<i>20 mm</i>	<i>n. 1,8 m</i>	<i>[5]</i>
<i>Diffuusioavoin aluskate</i>	-	<i>0,03 – 0,02 m</i>	<i>[6], [7]</i>

2.3.2 Konvektio

Konvektiivisia ilman virtauksia syntyy ilmanpaine-eroista, joita aiheuttavat tuuli, lämpötilaerot ja ilmanvaihtojärjestelmä. Suomessa on tyypillisesti talvisin suuret lämpötilaerot sisä- ja ulkoilman välillä. Ja vaikka rakennukset pyritään tekemään hieman alipaineisiksi koneellisen ilmanvaihdon avulla, niin varsinkin talvisin huoneiden yläosiin saattaa muodostua ylipaineisia kohtia. Tällöin sisäilma menee helposti rakenteiden raoista ja höyrynsulun epätiiviydestä kohdista yläpohjaan.

Ilmavirtausten mukana kulkeutuu ilmankosteutta, jolloin puhutaan kosteuden konvektiosta. Kosteuden konvektiota voi tapahtua raoissa ja rei'issä sekä huokoisissa materiaaleissa. Kosteuden kulkeutuminen ilmavirtausten mukana on kuitenkin merkityksel-

lisintä rakojen ja reikien kautta [1]. Kun ilmavirta kulkee korkeammasta lämpötilasta matalampaan, niin ilman suhteellinen kosteus nousee. Jos lämpötila on alle kastepisteen, niin kosteus tiivistyy, eli syntyy kosteuden kondenssi. Tällöin kosteutta voi ilmavirtausten johdosta kerääntyä rakenteisiin haitallisen suuria määriä. Tämänlainen tilanne saattaa esiintyä esimerkiksi silloin, kun yläpohjan höyrinsulussa on epätiivis kohta, josta kostea sisäilma kulkeutuu yläpohjarakenteen sisään sisäpuolisen ylipaineen ajamana. Jos taas ilmavirta kulkee matalammasta lämpötilasta korkeampaan, niin ilman suhteellinen kosteus laskee. Tällöin ilma voi sitoa itseensä kosteutta ja siten kuivattaa rakenteita. Tämänlainen tilanne on yläpohjarakenteessa esimerkiksi keväisin ja kesäisin vesikatteen ja aluskatteen välisessä tuuletusvälissä.

2.4 Kondenssi

Kondenssi on vesihöyryn tiivistymistä vedeksi. Se syntyy, kun kostea ilma kohtaa pinnan tai huokosseinämän, jonka lämpötila alittaa ilman vesihöyryn kyllästymispisteen. Kondenssi voi syntyä rakenteen pintaan tai rakenteen sisään. Rakenteen sisässä rakennekerrosten rajapinnat ovat kondenssin muodostumiselle kriittisiä kohtia, kun vesihöyryn läpäisevyyden arvo muuttuu. Tällöin on yleensä kyse diffuusiolla siirtyvästä kosteudesta.

Konvektion synnyttämä kondenssi voi muodostua silloin, kun ilmavirta kohtaa pinnan, jonka lämpötila on ilman kastepistettä alhaisempi. Konvektiolla muodostuvan kosteuden määrää on vaikea arvioida, koska on vaikea arvioida miten suuri osa ilman kosteudesta kondensoituu sen kohdatessa kylmän pinnan [1]. Yläpohjarakenteissa kondenssi saattaa tavallisesti muodostua vesikatteen alapintaan tai vesikatteen alusrakenteeseen, joiden lämpötila on lähellä ulkoilman lämpötilaa.

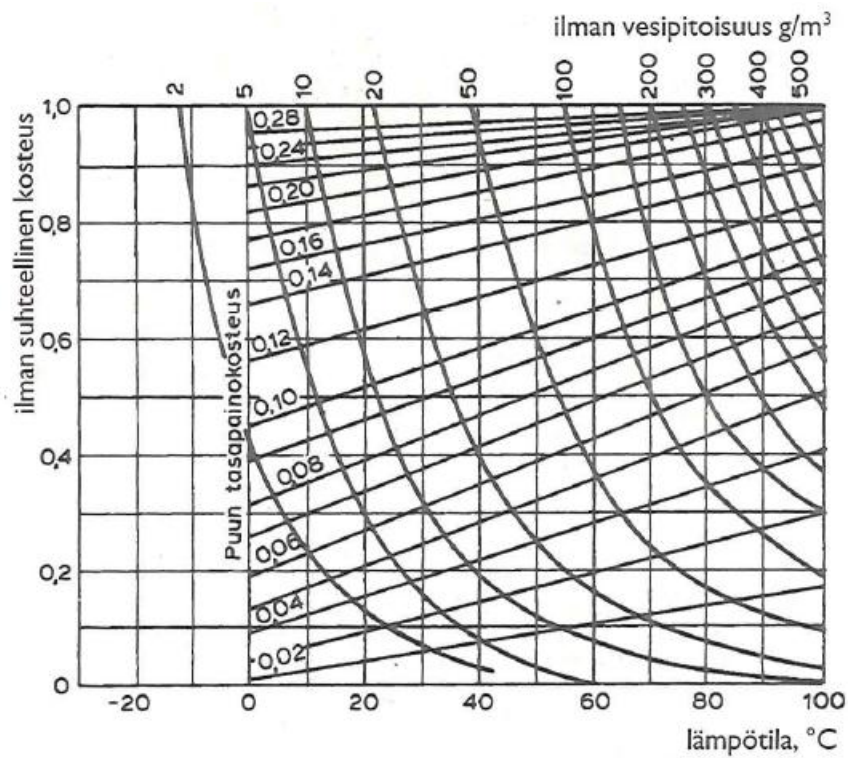
2.5 Kosteuden sitoutuminen

Yläpohjarakenteessa kosteus voi sitoutua materiaaleihin lähinnä vapaasta vedestä **kapillaarisesti** tai ilmassa olevasta vesihöyrystä **hygroskooppisesti**. Rakennusmateriaaleista puu on hyvin kapillaarista ja se pystyy imemään itseensä kosteutta huomattavasti ollessaan kosketuksissa vapaan veden kanssa.

Materiaali on hygroskooppista, jos se pystyy sitomaan ympäröivästä ilmasta kosteutta ja luovuttamaan sitä ilmaan. Kun materiaalin huokosissa on sama suhteellinen kosteus kuin ympäröivässä ilmassa, on materiaalissa saavutettu ns. hygroskooppinen tasapainokosteus. Materiaalin hygroskooppisuus vaihtelee sen mukaan onko kyseessä kostuminen (adsorptio) vai kuivuminen (desorptio). Hygroskooppisuutta kuvataan materiaalikohtaisesti sorptio- eli tasapainokosteuskäyrillä.

Ilman suhteellisen kosteuden noustessa hygroskooppiset materiaalit sitovat itseensä ilman kosteutta. Materiaaleista puu on hyvin hygroskooppinen, kun taas mineraalivilla on vain vähän hygroskooppinen. Kuvassa (Kuva 2) on esitetty puun tasapainokosteus-

käyrä. Siinä puun kosteuspitoisuus on esitetty painoprosentteina ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan. Kosteuspitoisuus painoprosentteina tarkoittaa kosteuden määrää suhteessa puun kuivapainoon.



Kuva 2: Puun tasapainokosteuskäyrä [8]

3 KRIITTISET KOSTEUS- JA LÄMPÖTILA- OLOSUHTEET

Rakenteen tulee toimia kosteusteknisesti hyvin. Tämä tarkoittaa sitä, että rakenteesta ei aiheudu rakennuksen käyttäjille tai naapureille hygienia- tai terveystarpeita ja rakenteen tulee säilyä tällaisessa kunnossa normaalilla kunnossapidolla kohtuullisen käyttöajan ajan [9]. Mikäli rakenne ei täytä näitä hyvän kosteusteknisestä toiminnan edellytyksiä, niin rakenteessa on todennäköisesti vaurio. Kun vaurion syynä on kosteus, niin silloin kyseessä on kosteusvaurio. Rakenteeseen syntyy kosteusvaurio, kun materiaalien kosteuden sietokyky ylittyy. Puurakenteisessa jyrkässä katossa kosteus ei sellaisenaan vaurioita rakenteita, vaikka kosteuspitoisuudet rakennusmateriaaleissa olisivatkin hetkellisesti korkeita. Rakenteen suuri kosteuspitoisuus saattaa kuitenkin luoda suotuisat kasvuolosuhteet erilaisille mikrobeille, jotka voivat aiheuttaa ihmisille terveyshaittoja tai vaurioittaa rakenteen mekaanista kestävyyttä.

Mikrobit ovat osa normaalia elinympäristöä ja niitä esiintyy luonnossa kaikkialla. Rakennuksen sisäilma tulee ulkoa, jolloin myös mikrobeja kulkeutuu rakennuksen sisälle. Mikrobit löytävät tiensä helposti rakennusten pinnoille ja rakenteiden sisään ilman mukana. Mikrobien pääsyä rakennukseen ei ole siten järkevää pyrkiä rajoittamaan, vaan niiden kasvua tulee rajoittaa muilla keinoilla.

Mikrobit tarvitsevat kasvaakseen lämpöä, kosteutta ja ravinteita. Näistä kosteus on keskeisin tekijä, koska se on näistä ainoa tekijä, jonka pääsyä rakenteisiin on mahdollista kontrolloida.

3.1 Yleistä mikrobilajeista

Rakennuksissa esiintyviä mikrobeja ovat erilaiset bakteerit ja sienet. Sienilajit voidaan edelleen jakaa niiden aiheuttamien ongelmien ja vaurioiden mukaan home-, sinistäjä- ja lahottajasieniin [3]. Rakennusten kosteusvaurioiden yhteydessä puhutaan usein pelkästään homeista, vaikka todellisuudessa mikrobikasvuun voi liittyä samanaikaisesti useita eri mikrobilajeja.

Homesienet ovat yksinkertaisia eliöitä, jotka kasvavat yleensä materiaalin pinnalla ja ne voivat aiheuttaa materiaalin pinnan värimuutoksia ja värjäytymistä. Rakennusten kosteusvauriotapauksissa homesienet ovat mikrobeista yleensä ensimmäisiä, jotka ilmaantuvat kosteusvauriokohtaan. Homesienet voivat elää melkein minkälaisilla pinnoilla tahansa, kunhan olosuhteet ovat otolliset. Homesienten aiheuttamat terveyshaitat ovat yleensä peräisin runsaista homeitiöpitoisuuksista tai homeiden erittämistä aineenvaih-

duntatuotteista tai muista hiukkasista. Se minkäläistä haittaa homekasvustosta on, riippuu muun muassa homesienilajista, esiintymislaajuudesta, kasvuston kehitymisasteesta sekä kasvualustasta. [3]

Sinistäjä sienet voivat aiheuttaa homesienten tapaan materiaalin pinnan värimuutoksia ja värjäytymistä.

Lahottajasienet ovat puurakenteille ongelmallisia, koska ne tuhoavat puun mekaanista kestävyyttä. Ne käyttävät ravinnokseen puun selluloosaa ja ligniiniä ja kasvattavat rihmastonsa puun sisälle. Lahottajasienten kasvua ei helposti huomaa puussa. Kun laho on edennyt pitkälle ja puu kuivuu, voidaan siinä havaita värimuutoksia ja halkeilua. [3]

Rakennuksissa esiintyvistä bakteereista tavallisimpia ovat aktinomykeetit eli sädesienet. Ne aiheuttavat kosteusvauriotapauksissa voimakkaan, tunkkaisen kellarinomaisen hajun.

Rakennusten kosteusvaurioissa home- ja laho-ongelmat ovat hyvin monimuotoisia ja niihin voi liittyä samaan aikaan useita eri mikrobilajeja. Kosteusvaurion kehittyessä vauriokohtaan ilmestyvät yleensä ensimmäisinä home- ja sädesienikasvustot. Myöhemmin rakenteen sisältämän kosteuspitoisuuden kohotessa ilmaantuvat sinistäjä- ja lahottajasienet. [10]

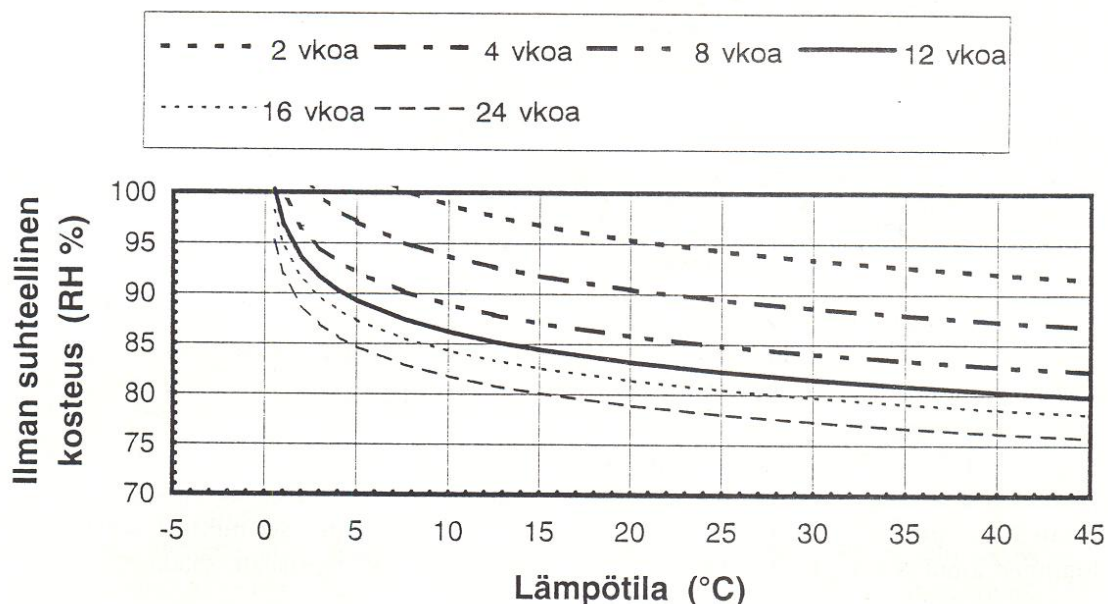
3.2 Mikrobien kasvuolosuhteet

Mikrobikasvuston syntyminen vaatii niin sanotut **kriittiset olosuhteet** [11], joiden tärkeimpinä tekijöinä ovat kosteus ja lämpötila. Oleellista kosteuden ja lämmön lisäksi on näiden vaikutusaika. Yhdessä nämä tekijät voivat muodostaa mikrobikasvustolle suotuisat olosuhteet. Eri mikrobilajeilla kriittiset olosuhteet ja tarvittava vaikutusaika ovat erilaiset. Jotkin mikrobilajit tarvitsevat enemmän kosteutta ja aikaa kuin toiset. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että mitä suotuisammat olosuhteet ovat mikrobien kasvuille, niin sitä suurempi on ongelmallisen mikrobikasvuston riski. Kriittisten olosuhteiden rajoilla mikrobien kasvu on hidasta.

Rakennuksessa mikrobit voivat kasvaa lämpötilan ollessa +5...+40°C, mutta nopeinta kasvu on +20...+30°C lämpötiloissa [12].

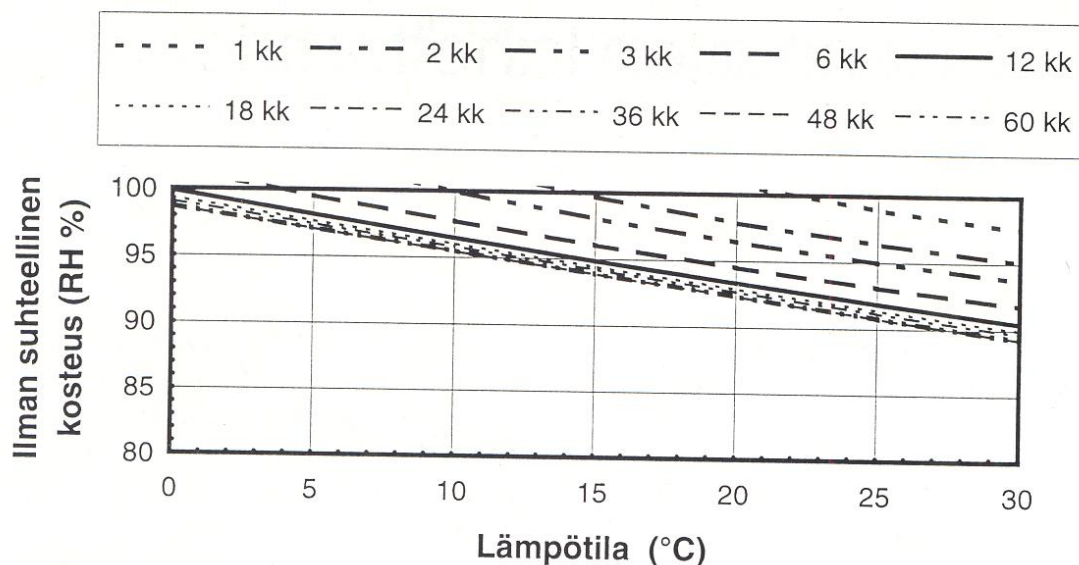
Homesienet tarvitsevat kasvaakseen kosteutta. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia arvoja sille, kuinka korkea tulee ilman suhteellisen kosteuden vähintään olla, jotta homesienet voisivat kasvaa. Lähteen [2] mukaan homeenkasvun riski on pieni, kun ilman suhteellinen kosteus on 70–85%, ja homeenkasvun riski on suuri, kun ilman suhteellinen kosteus on yli 85 %. Lähteessä [12] esitetään, että homesienten ja hiivojen kasvun vähimmäiskosteusvaatimus on 65–85% (RH). Lähde [3] esittää, että homesienten kasvun minimirajana voidaan pitää 80 % ilman suhteellista kosteutta vastaavaa kosteutta. Tällöin kasvu voi alkaa, mutta on erittäin hidasta. Ongelmaksi homeet kasvavat vasta, kun suhteellinen kosteus on yli 90 % ja lämpötila on välillä +10...+50°C [3]. Kuvassa (Kuva 3) on esitetty homeen kasvuun vaadittavat kriittiset olosuhteet ja niiden vaikutus-

aika. Kun kasvusto on kerran alkanut, riittää sen ylläpitämiseen alhaisempi ilman suhteellinen kosteus kuin kasvun alkamiseen tarvittava ilman suhteellinen kosteus. Rihmas-
to voi kasvaa ja tuottaa itiöitä, kun sen kasvualustana toimivan puun kosteuspitoisuus on 20 – 150 % [11].



*Kuva 3: Homeen kasvun alkamiseen tarvittavien kriittisten kosteus- ja lämpötilaolosuh-
teiden vaikutusajat [11]*

Lahottajasienet, sädesienet ja sinistäjä sienet vaativat kasvaakseen enemmän kosteutta kuin homesienet [10]. Lahottajasienten kasvamiseen tarvitaan yleensä selvä kosteuslähde. Ongelmia lahottajasienet aiheuttavat silloin, kun rakenne on pitkään märkänä. Tällöin suhteellisen kosteuden tulee olla yli 95 % useita viikkoja tai kuukausia. Kuvassa (Kuva 4) on esitetty lahottajasienten kasvuun vaadittavat kriittiset olosuhteet ja niiden vaikutusaika. [11]



Kuva 4: Lahottajasienten kasvun alkamiseen tarvittavien kriittisten kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden vaikutusajat [11]

Homekasvuston kehittyminen vaatii selvästi vähemmän kosteutta ja aikaa kuin lahon kehittyminen. Kaikista mikrobilajeista homeet ilmestyvät ensimmäisinä kosteusvaurioituneeseen rakenteeseen. Mikrobin aiheuttamaa rakenteiden vaurioitumista voidaan siis tarkastella homeen kasvun näkökulmasta. Kun olosuhteet eivät ole homeenkasvulle suosiolliset, niin ne eivät ole suosiolliset myöskään bakteereille, lahottaja- tai sinistäjäsiemenille.

Homeen kasvu alkaa, kun kosteutta ja lämpöä on riittävästi. Jos ilman suhteellinen kosteus laskee kriittisten olosuhteiden alapuolelle, niin homeen kasvu hidastuu tai pysähtyy. Tämä ilmenee pinnan homeisuuden vähenemisenä tai homeen ilmaantumisen hidastumisena. Jos suhteellinen kosteus laskee reilusti kriittisen kosteuden alapuolelle, niin homekasvusto alkaa vähentyä. Kun ilman suhteellinen kosteus taas nousee, niin kasvusto jatkaa kasvuaan. Kasvusto ei tuhoudu kokonaan, vaikka rakenne kuivuisi väliaikaisesti. Itiöt sietävät hyvin kuivuutta ja osa kasvustosta voi jatkaa kasvuaan taas, kun rakenne kostuu. Vaihtelevissa olosuhteissa homesienten kehittymiselle on oleellista näiden suotuisten ja epäsuotuisten ajanjaksojen esiintymistiheydet ja kestot [3].

3.3 Homeen kasvun mallintaminen, ns. homemalli

Homeen kasvulle on kehitetty matemaattinen malli, joka on niin sanottu homemalli. Homemalli on kehitetty alun perin VTT:llä ja sitä on myöhemmin paranneltu ja laajennettu VTT:n ja TTY:n yhteisessä tutkimushankkeessa. Homeen kasvun mallintaminen perustuu laboratoriossa tehtyihin homeutumiskokeisiin, joita on tehty useilla eri materiaaleilla monenlaisissa eri olosuhteissa. Homeutumiskokeiden perusteella määritettiin homeutumisen kasvua ja kehittymistä kuvaamaan homeindeksi M . Homeindeksi kuvaa homeen kasvua taulukon (Taulukko 4) mukaisesti.

Taulukko 4: Homeen kasvun arviointi homeindeksin avulla [3]

Homeindeksi	Havaittu homekasvu	Huom.
0	ei kasvua	pinta puhdas
1	mikroskoopilla havaittava kasvu	itiöt itävät, alkavaa homekasvua
2	selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	pinnalla melkoisesti rihmastoja, yli 10 % peitto tutkittavasta alasta
3	ensimmäiset visuaaliset havainnot	uusia itiöitä alkaa muodostua
4	selvästi silmin havaittava kasvu	10 – 50 % peitto tutkittavasta alasta
5	runsas silmin havaittava kasvu	yli 50 % peitto tutkittavasta alasta
6	erittäin runsas kasvu	lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Homeen kasvu alkaa ja itiöt alkavat itää, kun homeindeksi saavuttaa arvon 1. Homeindeksin kehittyminen arvoon 1 kuvaa sitä aikaa, mikä tarvitaan homeen kasvun alkamiseen, kun olosuhteet ovat suosiolliset.

Matemaattisissa mallissa homeen kasvuun vaikuttavia tekijöinä on otettu huomioon ilman suhteellinen kosteus, lämpötila ja kasvualustana toimiva materiaali. Homeindeksin yhtälö luotiin alun perin kuvaamaan männyn pintapuussa esiintyvää homeen kasvua ja muiden materiaalien vaikutus on otettu jälkepäin yhtälössä huomioon erilaisina kertoimina. Homeen kasvulle suosiollisissa olosuhteissa homeindeksi kasvaa ja epäsuosiollisissa olosuhteissa homeindeksi vähenee, eli taantuu.

Homeen kasvu voi alkaa kun olosuhteet ovat suosiolliset riittävän pitkän aikaa. Suosiolliset olosuhteet riippuvat ilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta. Mitä pidemmän aikaa vallitsevat suosiolliset olosuhteet, sitä enemmän homekasvusto kehittyy, eli sitä suuremmaksi kasvaa homeindeksi. Tarvittava ilman suhteellinen kosteus riippuu vallitsevasta lämpötilasta kaavan (19) mukaisesti. Mitä alhaisempi lämpötila on, sitä suurempi suhteellinen kosteus vaaditaan, jotta home alkaisi kasvaa. Jos kosteus on tämän kriittisen arvon alapuolella, niin homeen kasvun kannalta on kyseessä niin sanottu kuiva kausi, joka selvästi hidastaa tai pysäyttää kasvun. Homeen kasvulle suosiollisten olosuhteiden lämpötilan tulee olla välillä 0 - 50°C. [3], [13]

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267 \cdot T^3 + 0,160 \cdot T^2 - 3,12 \cdot T + 100,0, & \text{kun } T \leq 20 \\ RH_{min}, & \text{kun } T > 20 \end{cases} \quad (19)$$

T = lämpötila (°C)

RH_{min} = Suhteellisen kosteuden minimiarvo (ks. Taulukko 6)

Kertoimelle RH_{min} on annettu arvoja taulukossa (Taulukko 6) riippuen homeen kasvualustan materiaalista. [3], [13]

Kun tutkittiin homeen kehittymistä homeindeksin arvosta 1 arvoon 3, niin huomattiin homeindeksin kasvavan vakio-olosuhteissa parabolisesti. Tästä saatiin homeindeksiä kuvaava differentiaaliyhtälö

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln RH + 0,14W - 0,33SQ + 66,02)} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (20)$$

RH = suhteellinen kosteus (%)

W = puulaji (0 = mänty, 1 = kuusi)

SQ = pinnan ravinteikkuus (0 = sahapinta, 1 = kuivaamossa vallinnut puun pinta)

k_1 = homehtumisnopeus (ks. Taulukko 6)

k_2 = homeindeksin hidastumista kuvaava kerroin (ks. Taulukko 6)

Termi k_1 kuvaa homehtumisnopeutta, joka riippuu homeen kasvualustasta ja siitä onko kyseessä homeen itämisvaihe ($M = 0 \dots 1$) vai homeen kasvuvaihe ($M > 1$). Kerroin k_2 kuvaa homeindeksin kasvun hidastumista, kun kasvu alkaa lähestyä huippua välillä $4 < M < 6$. Kertoimille k_1 ja k_2 on annettu valmiita arvoja taulukossa (Taulukko 6). [13]

Homeen kasvun suurin saavutettavissa oleva taso, eli homeindeksin suurin mahdollinen arvo, on vahvasti riippuvainen kasvuolosuhteista ja kasvualustan materiaalista [13]. Tätä varten on määritetty homeindeksin maksimaalinen arvo M_{\max} riippuen olosuhteista ja materiaalista [13]

$$M_{\max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (21)$$

A , B ja C = materiaalista riippuva kerroin (ks. Taulukko 6)

Home kasvaa eri materiaaleissa eri tavalla. Kasvu on joissakin materiaaleissa erityisen nopeaa ja joissakin materiaaleissa erityisen hidasta. Eri materiaalit voidaan jakaa homeen kasvulle herkkiin ja vastustuskykyisiin materiaaleihin sekä johonkin siltä väliltä taulukon (Taulukko 5) mukaisesti.

Taulukko 5: Rakennusmateriaalien jako homeen kasvulle herkkiin ja kestäviin materiaaleihin [13]

Homehtumisherkyys	Materiaalit
hyvin herkkä	käsittelemätön, runsaasti ravinteita sisältävä puu
herkkä	höylätty puu, paperipintaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt
kohtalaisen kestävä	sementtipohjaiset materiaalit, muovipohjaiset materiaalit, mineraalivillat
kestävä	lasi- ja metallimateriaalit, tehokkaita suoja-aineita sisältävät

Taulukossa (Taulukko 6) on esitetty homeindeksin laskemiseksi tarvittavat kertoimet. Taulukossa materiaalit on jaettu ryhmiin sen mukaan ovatko materiaalit homeen kasvulle herkkiä, vastustuskykyisiä vai jotain siltä väliltä.

Taulukko 6: Homeindeksin laskemiseksi tarvittavat kertoimet rakennusmateriaalin homehtumisherkkyyden mukaan [13]

Homehtumisherkyys	k_1		$k_2 (M_{\max})$			RH_{\min}
	$M < 1$	$M \geq 1$	A	B	C	
hyvin herkkä	1	2	1	7	2	80
herkkä	0,578	0,386	0,3	6	1	80
kohtalaisen kestävä	0,072	0,097	0	5	1,5	85
kestävä	0,033	0,014	0	3	1	85

Homeindeksin on todettu kokeiden mukaan hidastuvan tai jopa vähenevän, kun olosuhteet homeen kasvulle ovat epäsuosiolliset. Olosuhteet ovat epäsuosiolliset silloin, kun suhteellinen kosteus on alle kriittisen arvon (19), jolloin on kyseessä niin sanottu kuiva kausi. Kuivana kautena home ei kasva, vaan rihmasto kuivuu ja katkeilee. Tällöin homeindeksi pienenee. Kuiva jakso pienentää homeindeksiä sitä enemmän mitä pidempi on kuivan jakson pituus, mutta sen vaikutus ei ole lineaarinen. Kuivan jakson vaikutus homeindeksiin voidaan jakaa kolmeen osaan sen mukaan miten pitkä kuiva jakso on. Ensimmäisten 6 tunnin aikana taantuminen on voimakkainta ja homeindeksi pienenee silloin eniten. Tämän jälkeen taantumassa on tasainen 18 tunnin mittainen vaihe, jolloin homeindeksi pysyy ennallaan. Tasaisen vaiheen jälkeen homeindeksi jatkaa pienentämistään, mutta taantumanopeus ei ole yhtä suuri kuin ensimmäisten tuntien aikana. Matemaattisesti taantuminen voidaan esittää kaavalla [13]

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0,00133, & \text{kun } t - t_1 \leq 6h \\ 0, & \text{kun } 6h \leq t - t_1 \leq 24h \\ -0,000667, & \text{kun } t - t_1 > 24h \end{cases} \quad (22)$$

t = aika (h) muutoshetkestä t_1

On todettu, että homeen kasvualustana toimivalla materiaalilla on vaikutusta homeen taantumanopeuteen [14]. Taantumanopeus on suurin männyn pintapuussa ja pienempi muissa materiaaleissa. Taantumanopeuden suhdetta muiden kuin männyn homehtumisherkkyyteen ei kuitenkaan tunneta tarkasti. Taantumanopeutta voidaan esittää kertoimella C_{mat} , joka kuvaa taantumanopeutta tarkasteltavassa materiaalissa verrattuna suurimpaan mahdolliseen taantumanopeuteen, eli homeen taantumanopeuteen männyn pintapuussa [14]

$$\frac{dMo}{dt}_{mat} = C_{mat} \cdot \frac{dMo}{dt}_0 \quad (23)$$

$\frac{dMo}{dt}_{mat}$ = homeen taantumanopeus kussakin materiaalissa

$\frac{dMo}{dt}_0$ = homeen taantumanopeus männyn pintapuussa

C_{mat} = materiaalikohtainen suhteellinen kerroin homeen taantumanopeudelle

Kertoimelle C_{mat} voidaan laboratoriokokeiden mukaan antaa arvoja 1; 0,5; 0,25 tai 0,1 sen mukaan kuinka suuri taantumanopeus on verrattuna taantumanopeuteen männyn pintapuussa. Kertoimelle C_{mat} ei vielä löydy kirjallisuudesta materiaalikohtaisia valmiita arvoja. Tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella voidaan kertoimelle C_{mat} antaa kuitenkin suuntaa-antavia karkeita arvoja joillekin materiaaleille taulukon (Taulukko 7) mukaan.

Taulukko 7: Taantumakertoimen suuntaa-antavat karkeat arvot joillekin rakennusmateriaaleille

Taantumakerroin C_{mat}	Materiaali
1	käsittelemätön puu
0,5	kevytbetoni
0,25	betoni, kuusilauta, polyuretaani (päällystämätön), lasivilla
0,1	kevytsorabetoni, polyesterikuitueriste, EPS

Taulukon (Taulukko 7) taantumakertoimen arvot on arvioitu lähteen [14] kuvasta 3, jossa on esitetty laboratoriokokeista saatuja taantumakertoimen arvoja eri materiaaleille.

Homeen kuvaamiseen tarkoitettu matemaattinen malli on vaatinut todellisen ilmiön yksinkertaistamista. Malli ei kuvaa täydellisesti homeen kasvua ja kehittymistä, mutta sitä voidaan pitää riittävän tarkkana työkaluna arvioitaessa homeen kasvun riskiä ja sen suuruusluokkaa. [13]

Homemallin rajoitukset

Homemallissa suurin epävarmuustekijä liittyy homeen taantumisen kuvaamiseen. Alkuperäiset laskentakaavat homekasvuston taantumiselle perustuvat suhteellisen vähäiseen määrään laboratoriokokeita ja ne kattavat pituudeltaan 6 h – 14 vrk aikajaksoja. Aikajaksot ovat suhteellisen lyhyitä, kun arvioidaan homekasvuston taantumista vuosien aikajaksoissa. Näin ollen pitkien taantumajaksojen kuvaaminen ei ole homemallilla kannattavaa, koska se voi johtaa virheelliseen arvioon homeen kasvun lopullisesta tasta. [3]

Homeen kasvua ei ole mallinnettu alle 0-asteen lämpötiloissa. Kokemuksesta tiedetään, että home ei kasva merkittävästi kylmissä olosuhteissa. Ei ole kuitenkaan tutkittua tietoa siitä miten alle 0-asteen lämpötila vaikuttaa homeen kasvuun tai taantumiseen. Näin ollen homeindeksin laskentakaavat eivät kuvaa homeen kasvua luotettavasti kylminä vuodenaikoina, kuten talvella ja keväällä. [15]

3.4 Haitallisen homekasvuston määrittely

Rakennusmääräyskokoelman osan C2 kappaleen 1.2 mukaan on selvää, että home on rakennuksessa haitallista silloin, kun siitä on terveyshaittaa. Terveyshaitta on määritetty lähteessä [12] seuraavasti: ”Terveysuojelulain 1 §:ssä terveyshaitalla tarkoitetaan muu muassa elinympäristössä olevasta tekijästä tai olosuhteesta aiheutuvaa sairautta tai sen oireita. Terveyshaittana pidetään myös altistumista terveydelle vaaralliselle aineelle tai tekijälle siinä määrin, että sairauden tai sen oireiden syntyminen on mahdollista. Tällainen tilanne saattaa syntyä silloin, kun ihminen asuu tai oleskelee asunnossa, jossa hän voi altistua mikrobikasvustosta peräisin oleville soluille tai mikrobien aineenvaihduntatuotteille”. Terveyshaitan edellytys on siis altistuminen, joka tapahtuu pääasiassa silloin, kun ihmisen hengitysteihin tai iholle kulkeutuu sisäilman mukana tai rakennuksen pinnoista mikrobien itiöitä tai mikrobeista peräisin olevia aineenvaihduntatuotteita tai muita hiukkasia. Jos siis rakennuksessa on homekasvustoa, mutta sillä ei ole vaikutusta sisäilman laatuun, niin siitä ei välttämättä ole lainkaan terveyshaittaa.

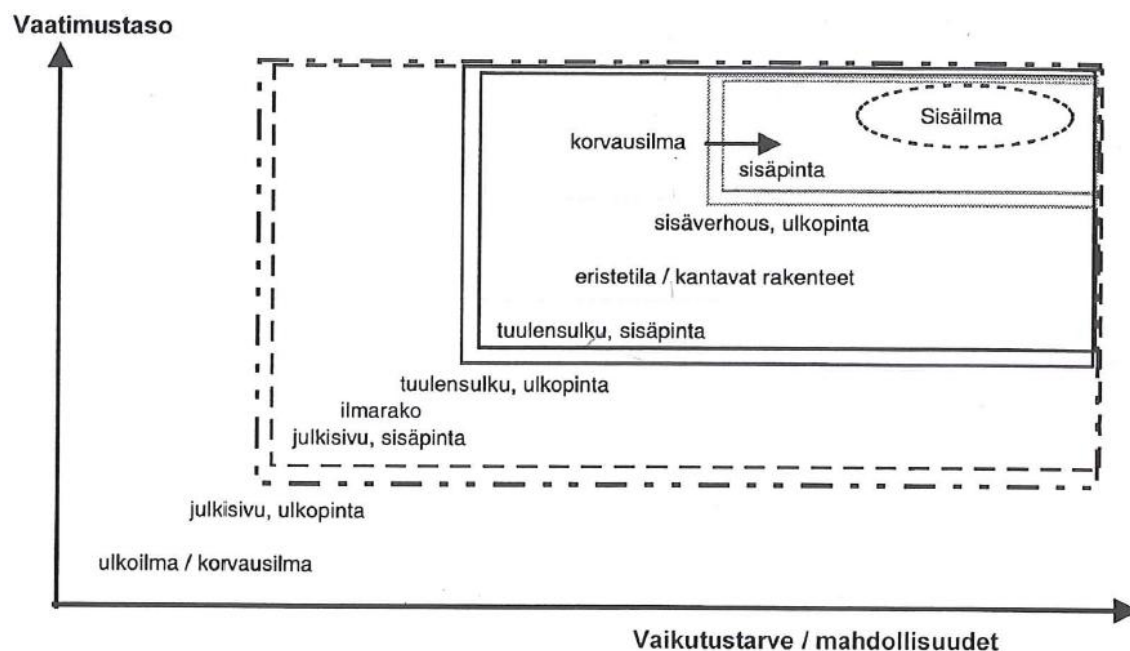
Toisaalta homeille altistuminen ei tarkoita sitä, että siitä olisi aina terveyshaittaa. Homeiden aiheuttamat terveyshaitat ovat hyvin riippuvaisia homelajista ja kasvualustasta. Lisäksi homeille altistuminen ei välttämättä lisää merkittävästi sairastumisen riskiä. [16]

Kun tarkastellaan rakennusta kokonaisuudessaan, niin Suomessa ei ole selviä kriteereitä sille, mikä homeenkasvu on haitallista ja mikä ei. Ei ole selvää ohjetta esimerkiksi sille, minkä suuruinen homekasvusto hyväksytään ulkoseinässä tuulensuojalevyn takana, jos sillä ei ole suurta vaikutusta sisäilman laatuun. Kriteereitä löytyy ainoastaan rakennuksen sisäilmalle, sisäpinnoille ja rakenteille, jotka ovat yhteydessä rakennuksen sisäilmaan. Sisätiloissa ja näkyvillä pinnoilla sekä rakenteiden sisällä, mistä vuotoilmaa kulkeutuu sisätiloihin, silminnähtävä homeenkasvu ei ole sallittua. Silminnähtävä homeenkasvu voidaan kuitenkin sallia, silloin kun kyseessä on satunnaista homeen kasvua kosteilla pinnoilla esimerkiksi kylpyhuoneessa tai keittiössä, mistä sen voi helposti pestä pois [12]. Lähteessä [12] mainitaan lisäksi, että myös silmin havaitsematon homeenkasvu on haitallista silloin, kun hometta kasvaa edellä mainituissa paikoissa ja samalla on perusteltua epäillä sen aiheuttavan terveyshaittaa.

3.5 Homeen kasvun sallittu taso

Minkälainen homeenkasvu sitten voidaan rakennuksessa sallia ja mikä ei. On selvää, että rakennuksen kaikille osille ei voida asettaa yhtä tiukkoja vaatimuksia homeen kas-

vun kannalta. Sisäilman ja rakennuksen sisäpintojen vaatimustason tulee olla korkein ja ulkoilmaa vasten olevissa rakenteissa voidaan sallia alhaisempi vaatimustaso. Ulkoilmaa lähellä olevissa rakennusosissa voidaan sallia jonkinasteista homeen kasvua, koska jo pelkät ulkoilman olosuhteet riittävät luomaan riskin homeen kasvulle [3]. Lähteessä [3] on esitetty periaatteellinen rakennusosien luokittelu vaatimustason ja vaikutustarpeen mukaisesti (Kuva 5).



Kuva 5: Homeen kasvulle asetettu periaatteellinen vaatimustaso ja vaikutusmahdollisuudet rakennuksen eri osissa [3].

Luokittelun mukaan lähempänä ulkoilmaa olevissa rakenteissa sallitaan homeen kasvulle ajoittain suosiolliset olosuhteet, jolloin homeen kasvun riski on suurempi. Rakennuksen sisällä homeen kasvun riskin tulee olla luonnollisesti pienempi ja samalla tulee olla mahdollisuus vaikuttaa homeen kasvulle suosiollisiin olosuhteisiin. Esimerkiksi ulkoilmaa vasten olevien rakenteiden kosteus- ja lämpötilaoloihin on vaikea vaikuttaa ja niiden vaatimustason tulee olla alhaisin.

Lähteessä [3] on esitetty eri rakennusosille viitteellisiä arvoja homeen kasvun salli- tuksi tasoksi. Siinä homeen kasvu on määritelty taulukon (Taulukko 4) mukaan visuaalisesti. Rakennuksen ulkoilmaa vasten olevissa rakennusosissa voidaan sallia lievää homeen kasvua, jolloin näkyvä homekasvusto saa peittää jatkuvassa käytössä enintään 5 – 10 % kasvualustastaan (vastanee homeindeksin arvoa 0 – 4, ks. Taulukko 4). Tällaisia rakennusosia ovat esimerkiksi ulkoseinän ulkoverhous, tuulensuojalevyn ulkopinta ja katon ruodelaudoitus. Näissä rakennusosissa homeen kasvun saattaa aiheuttaa lähinnä ulkoilman olosuhteet ja siten homeen kasvua on vaikea rajoittaa. Homeen rajoittaminen onnistuu lähinnä materiaalien pinnoittamisella aineilla, jotka estävät kosteuden imeytymistä tai mikrobien tunkeutumista materiaaliin. [3]

Rakenteen eristetilassa olosuhteet homeen kasvulle ovat erilaiset rakenteen ulko- osissa ja sisäosissa. Eristetilan ulko-osat tuulensuojan sisäpinnassa ovat homeen kasvun

kannalta riskialttiimpia kuin vastaavat sisäosat. Lähteen [3] mukaan eristetilassa sallitaan vähäistä homeen kasvua, joka tarkoittaa visuaalisesti täplinä havaittavaa homekasvua. Homekasvu voi peittää tarkastelupinnasta enintään 2 – 4 % (vastanee homeindeksin arvoa 0 - 3, ks. Taulukko 4). Homeen kasvu sallitaan lämmöneristyksen kylmissä osissa, mutta ei lämpimissä osissa. Tällöin homeenkasvun voidaan katsoa olevan seurausta ulkoilman korkeasta suhteellisesta kosteudesta syksyisin sekä siitä, että rakenteisiin kesällä sitoutunut hygroskooppinen kosteus lähtee ilman jäähtyessä kylmään suuntaan ja nostaa suhteellista kosteutta rakenteen kylmässä osassa. [3]

Rakennuksen sisäpinnoissa näkyvää hometta ei sallita. Näkyvä homekasvusto tarkoittaa homeindeksillä mitattuna sitä, että homekasvusto alkaa tuottaa homeitiöitä. Lähteen [3] mukaan sisäpinnoilla sallitaan vähäiset rihmastopartikkelit ja itiöt, jotka voidaan todeta mikroskooppianalysissä (vastanee homeindeksin arvoa 0 – 1, ks. Taulukko 4). Homeen esiintyminen sallitaan kuitenkin ainoastaan yksittäisinä poikkeuksellisinä ilmiöinä, ei tasaisesti toistuvina.

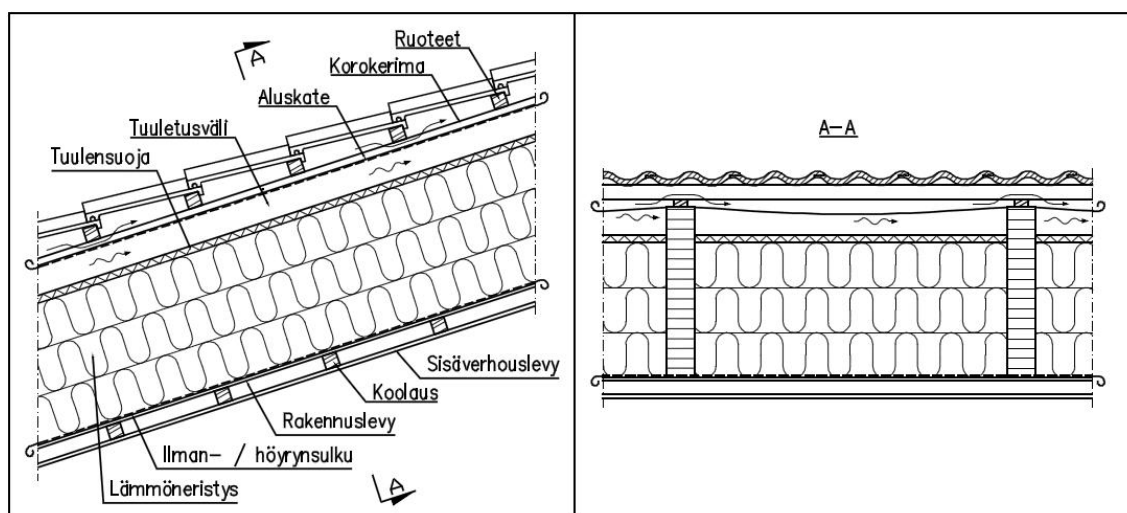
Homeen kasvun sallittu taso tarkoittaa homeen kasvua sellaisessa rakenteessa, jonka kosteustekninen toiminta on moitteetonta. Toisin sanoen homeen kasvu näissä rakennusosissa on luonnollista eikä sen esiintymiseen voida helposti vaikuttaa. On todettu [3], että pelkät ulko-ilman olosuhteet aiheuttavat joissakin rakennusosissa homeen kasvun riskin, joten jonkin tasoinen homeen kasvu rakennuksessa on luonnollista ja hyväksyttävää.

4 YLÄPOHJARAKENNE

Tässä kappaleessa esitellään Suomessa rakennettava perinteinen tuuletettu vino yläpohjarakenne, tässä työssä tutkittava tuulensuoja-aluskaterakenne sekä näiden rakenteiden oleelliset erot. Lisäksi kerrotaan tuulensuoja-aluskaterakenteen oleelliset hyödyt, aluskatteen tärkeimmät materiaaliominaisuudet sekä aluskatteen ilmatiiviiseen asentamiseen liittyviä näkökohtia.

4.1 Perinteinen vino yläpohja

Vino yläpohjarakenne on Suomessa perinteisesti kuvan (Kuva 6) mukainen.



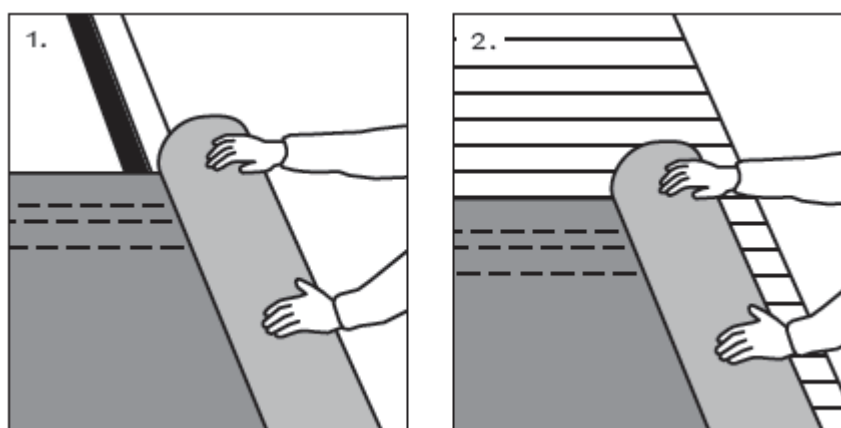
Kuva 6: Periaatekuva Suomessa perinteisesti rakennetusta tuuletetusta vinosta yläpohjasta.

Jyrkillä katoilla kattokaltevuus on vähintään 1:10 [5]. Vesikatteenä on tavallisesti epäjatkuva kate, kuten tiili-, pelti-, tai bitumilaattakate. Vesikatteen ja aluskatteen välissä on epäjatkuvilla katteilla pääsääntöisesti käytettävä tuuletusväliä, jonka korkeus on vähintään 20 – 50 mm riippuen aluskatetyypistä ja vesikattemateriaalista [5]. Tuuletusväli tehdään korokerimoilla, jotka on asennettu kattokannattajien päälle niiden suuntaisesti. Korokerimojen päälle asennetaan ruoteet vesikattemateriaalin mukaisella jaolla.

Epäjatkuvan vesikatteen alla on yleensä käytettävä aluskatetta, jonka pääasiallinen tarkoitus on johtaa vesikatteen alle joutunut vesi turvallisesti ulkoseinien ulkopuolelle. Aluskate myös estää vesikatteen alapintaan kondensoitunutta vettä pääsemästä rakenteen sisään. Lisäksi aluskate voi toimia kosteutta sitovana rakenteena, mikäli aluskatteen alapinnassa on kosteutta sitova kerros.

Rivipeltikatteen alle tarvittavan aluskatteen tarpeesta on Suomessa osittain ristiriitaisia ohjeita. Lähteiden [5] ja [9] mukaan rivipeltikatteen alla tulee pääsääntöisesti käyttää joko aluskatetta tai kosteuden sitovaa rakennetta. Lähde [17] on aluskatteen suhteen vaativampi ja ohjeistaa, että kosteutta sitova rakenne ei aina riitä. Aluskatetta tulee käyttää, kun katon kaltevuus on loivempi kuin 1:7 [17]. Lähde [18] on alusrakenteen suhteen vaatimattomin ja sen mukaan rivipeltikatteen yhteydessä ei yleensä käytetä aluskatetta.

Aluskatteet jaetaan Suomessa käyttötavan mukaan vapaasti asennettaviin aluskatteisiin ja kiinteälle alustalle asennettaviin aluskatteisiin [17] (Kuva 7). Suomessa kiinteälle alustalle asennettavat aluskatteet ovat perinteisesti olleet tiiviitä bitumipohjaisia kermialuskatteita, joita on käytetty pääasiassa rivipelti- ja bitumikattolaattakatteiden alla, mutta niiden käyttö on ollut mahdollista myös tiilikatteiden alla. Vapaasti asennettavat aluskatteet asennetaan kattokannattajien väliin ”roikkuvana”. Näitä aluskatteita on Suomessa käytetty pääasiassa tiili-, profiilipelti- ja pystysaumakatteiden alla, mutta niiden käyttö on ollut mahdollista myös rivipeltikatteen alla. Taulukossa (Taulukko 8) on esitetty Suomessa käytettyjä aluskateratkaisuja käytetyn vesikattemateriaalin mukaan.



Kuva 7: Vapaasti asennettava aluskate (vasemmalla) ja kiinteälle alustalle asennettava aluskate (oikealla)

Taulukko 8: Epäjatkuvien katteiden yhteydessä käytetyt aluskateratkaisut [17].

Kate	Vapaasti asennettava aluskate	Kiinteälle alustalle asennettava aluskate
Bitumikattolaatta	–	X
Kattotiili * Betoni- ja savitiili	X	X
Rivipelti	X	X
Pystysaumakate	X	–
Profilipelti * Poimu- ja muotolevyt	X	–

Vapaasti asennettavat aluskatteet voidaan jakaa edelleen hyvin vesihöyryä läpäiseviin (vesihöyryavoimiin) ja vesihöyrytiivisiin aluskatteisiin. Tavallisesti Suomessa on käytetty vesihöyrytiivitä aluskatteita, koska ne ovat hinnaltaan halvempia ja ne sopivat perinteisessä yläpohjassa tarkoitukseensa hyvin, eli siihen, että aluskate johtaa vesikatteen alle päässeen veden ulkoseinien ulkopuolelle. Vapaasti asennettavia vesihöyrytiivitä aluskatteita ovat muovilaminoidut kartonkialuskatteet sekä yhden, kahden tai useamman muovin yhdistelmästä ja lujitteesta laminoidut aluskatteet [5].

Vesihöyryavoimien aluskatteiden toimintatapa perinteisessä yläpohjassa on sama kuin vesihöyrytiivien aluskatteiden. Niiden etuna voidaan pitää sitä, että kosteus pääsee yläpohjasta poistumaan tuuletusvälin lisäksi myös aluskatteen läpi. Vesihöyryavoiminen aluskatteiden käyttö on Suomessa tällä hetkellä yleistymässä. Vesihöyryavoiminta aluskatetta voidaan käyttää myös toisenlaisessa yläpohjarakenteessa, joka poikkeaa perinteisestä yläpohjasta. Tätä rakennetta on käsitelty tarkemmin tämän työn kappaleessa 4.2.

Aluskatteiden jako vapaasti asennettaviin ja kiinteälle alustalle asennettaviin aluskatteisiin on esitetty lähteessä [17]. Siinä on julkaistu myös aluskateluokitus, jossa esitetään aluskatteilta vaadittavat tärkeimmät materiaaliominaisuudet. Aluskateluokituksesta ei kuitenkaan selviä mihin aluskateluokkaa kuuluvat ne aluskatteet, jotka voidaan asentaa suoraan lämmöneristeen päälle. Siinä ei myöskään ole omaa luokkaa vesihöyryä hyvin läpäiseville aluskatteille.

Tällä hetkellä Suomessa aluskatteen alapuolella on pääsääntöisesti oltava tuuletusväli ([5] kappale 3.2). Lähteessä [5] ei kyseisessä kohdassa erotella aluskatteita tiiviisiin ja vesihöyryavoimiin, vaan kyseinen kohta koskenee kaikkia aluskatteellisia rakenteita. Tuuletusvälin korkeudelle suositellaan eri lähteissä eri arvoja. Tuuletusvälin vähimmäiskorkeudeksi lähde [1] suosittelee 50 mm:ä, lähde [5] suosittelee 75 mm:ä ja lähde [17] suosittelee 100 mm:ä. Lähteessä [5] tuuletusvälin korkeus riippuu katon kaltevuudesta. Jyrkillä katoilla tuuletusvälin korkeudeksi lähde [5] suosittelee 75 – 100 mm:ä.

Tuuletusvälin on oltava yhteydessä ulkoilmaan. Tämä järjestetään yleensä tuuletusraoilla, jotka sijaitsevat räystäillä sekä harjalla ja/tai rakennuksen päädyissä.

Yläpohjan lämmöneristys asennetaan tavallisesti kattokannattajien väliin. Tosin nykyisin lämmöneristysvaatimusten kiristyessä ja siten lämmöneristeen määrän lisääntyessä voidaan osa lämmöneristeestä asentaa myös kattokannattajien ulko- tai sisäpuolelle. Lämmöneristeen päällä voidaan käyttää tuulensuojana esimerkiksi tuulensuojapintaista mineraalivillaa tai kosteuden kestävää jäykkää puukuitulevyä [20]. Kattokannattajien sisäpuolella on höyryn- ja ilmansulkuna toimiva kerros, joka tehdään yleensä vesihöyrytiivistä muovikalvosta, esimerkiksi PE-kalvosta. Höyrynsulun sisäpuolella on tavallisesti talotekniikalle varattu noin 50 mm korkea tila, joka tehdään koolaamalla. Koolauksen sisäpuolelle tehdään katon sisäverhous.

4.1.1 Tuuletuksen merkitys

Kattorakenne tuuletetaan ulkoilmalla aluskatteen ja lämmöneristeen välissä olevasta tuuletusvälistä. Jyrkillä katoilla rakenteen tuuletuksella on perinteisesti ollut kaksi päätehtävää:

- Tuuletus pitää vesikatteen kylmänä, jolloin vesikatteen päällä oleva lumi ei pääse sulamaan [19].
- Tuuletus mahdollistaa katon sisään päässeeseen kosteuden kulkeutumisen ulos tuuletusilman mukana [1].

Tuuletuksen tarkoitus on historiallisesti ollut pitää katto kylmänä, ettei katolla oleva lumi pääse sulamaan. Sulanut lumi on jäänyt talvisin räystäälle muodostaen katolle jäätä ja räystäältä roikkuvia jääpuikkoja. Jää on saattanut muodostaa padotustilanteen, jolloin vesi vuotaa vesikatteen alle. Nykyään kuitenkin hyvin lämmöneristettyjen yläpohjien ansiosta lämpövuoto kattorakenteen läpi on vähäistä ja kattorakenne pysyy kylmänä ilman tuuletusväliäkin. [19]

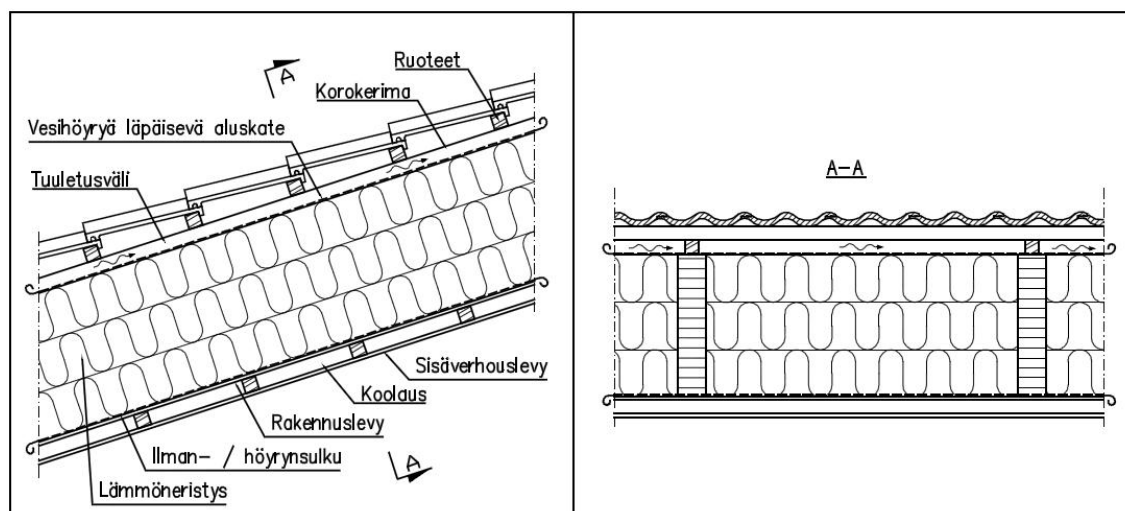
Toisaalta tuuletuksen on tiedetty lisäävän lämpöhäviöitä. Lämpöhäviöitä on pyritty joissain tapauksissa ehkäisemään tukkimalla rakenteen tuuletusväli tai -raot. Tämä on parantanut lämmön pysymistä sisätiloissa, mutta samalla se on estänyt kattorakenteeseen mahdollisesti päässeeseen kosteuden poistumisen.

Tuuletusilma kuivattaa rakennetta silloin, kun vesihöyrypitoisuus tuuletusvälin sisäpuolisen materiaalin pinnassa on suurempi kuin tuuletusvälin ilman vesihöyrypitoisuus [1]. Tällöin tuuletusväliin tuleva ilma sitoo itseensä kosteutta tuuletusvälin sisäpuolisista materiaaleista. Tuuletuksen kuivattavan vaikutuksen edellytyksenä on, että tuuletusilma kykenee sitomaan itseensä kosteutta. Tämä toteutuu hyvin keväisin ja kesäisin, mutta talvisin tilanne on toinen, kun ulkoilman suhteellinen kosteus on korkea. Talvisin tuuletusilma ei pysty sitomaan kosteutta juuri ollenkaan eikä tuuletusilma siten kuivata talvisin rakennetta.

Perinteisessä katossa aluskatteen alapuolisen tuuletuksen tehtävä nykyään on siis varmistaa, että katon sisään päässeellä ylimääräisellä kosteudella on mahdollisuus kulkeutua ulos. Toisin sanoen aluskatteen alapuolisella tuuletuksella varmistetaan kattorakenteen kuivumiskyky. Ylimääräistä kosteutta voi päästä kattorakenteisiin joko sadeveden vuodoista vesikatteen ja aluskatteen läpi tai sisäilman vuodoista ilmansulun läpi. Rakenteen kuivumiskyky voidaan kuitenkin varmistaa myös toisella tavalla, ja sitä käsitellään seuraavassa kappaleessa.

4.2 Tuulensuoja-aluskaterakenne

Kuvassa (Kuva 8) on esitetty tuulensuoja-aluskaterakenteen periaatepiirros.

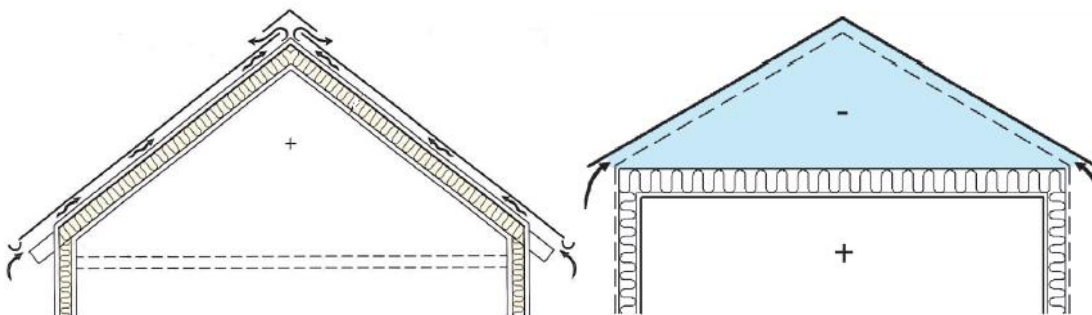


Kuva 8: Periaatekuva tuulensuoja-aluskaterakenteesta.

Tuulensuoja-aluskaterakenteessa ei ole aluskatteen alla tuuletusväliä, vaan aluskate on asennettu suoraan lämmöneristeen ja kattokannattajien päälle. Kattorakenteen sisään pääsevä kosteus voi poistua diffuusiolla aluskatteen läpi. Aluskatteen yläpuolella aluskatteen ja vesikatteen välissä on tuuletusväli, kuten perinteisessä tuuletetussa yläpohjarakenteessa.

Tuulensuoja-aluskaterakenteen olennainen osa on vesihöyryavoin aluskate. Sen merkittävimpiin ominaisuuksiin kuuluu ulkopuolinen veden- ja tuulenpitävyys sekä samalla suuri vesihöyrynläpäisevyys, eli aluskatteen toiminta rakenteessa on samantapainen kuin vaatteissa käytettävän Gore-Texin. Vesihöyryavoimia aluskatteita voidaan käyttää perinteisten tiiviiden aluskatteiden tapaan tuuletetuissa yläpohjarakenteissa, mutta lisäksi ne mahdollistavat uudenlaisen yläpohjarakenteen, tuulensuoja-aluskaterakenteen, toteuttamisen.

Tuulensuoja-aluskaterakenne voidaan tehdä sekä vinoon yläpohjaan että ullakkotilalliseen yläpohjaan. Kuvassa (Kuva 9) on esitetty näiden rakenteiden periaatteelliset ratkaisut.



Kuva 9: Vasemmalla on periaatekuva vinosta yläpohjasta [23] ja oikealla periaatekuva ullakkotilallisesta yläpohjasta [27]. Molemmissa tuuletus on pelkästään aluskatteen ja vesikatteen välissä.

Ullakkotilallisessa yläpohjassa ullakkotila suljetaan aluskatteella tuulettumattomaksi. Molemmissa yläpohjissa tuuletusväli on ainoastaan aluskatteen ja vesikatteen välissä. Ullakkotilan suuresta ilmatilasta johtuen saattaa ullakkotilassa esiintyä ilman konvektiovirtauksia enemmän kuin vinossa yläpohjassa.

4.2.1 Tuulensuoja-aluskaterakenteen hyödyt

Tuulensuoja-aluskaterakenteessa aluskate toimii perinteisen vesihöyrytiivin aluskatteen tapaan suojaten rakennetta vesikatteen alle päässeeltä vedeltä, mutta lisäksi aluskate toimii lämmöneristeen tuulensuojana. Aluskatetta voi myös käyttää tavalliseen tapaan rakennusaikaisena sääsuojana. Aluskatteen käyttö sääsuojana on kuitenkin yleensä rajattu muutamaankuukauteen riippuen aluskatevalmistajan ohjeista. Tuulensuoja-aluskaterakenteella on useita etuja verrattuna perinteiseen tuuletettuun yläpohjarakenteeseen.

- Aluskate muodostaa toisen ilmansulun rakenteeseen, jolloin vuotoilmavirtaukset rakenteen läpi vähenevät merkittävästi [21], [22], [23]. Tästä johtuen lämpöhäviöt rakenteen läpi pienenevät
- Suojaa lämmöneristettä kylmän ilman aiheuttamilta konvektiovirtauksilta eristeen sisällä (toimii tuulensuojana) [21], [23]. Tästä johtuen ilmavirtaukset eivät heikennä rakenteen lämmöneristävyttä.
- Suojaa lämmöneristettä sisään puhaltavaa lunta vastaan [23].
- Rakenne on yksinkertaisempi [22], rakennepaksuudeltaan ohuempi [24] ja rakennuskustannuksiltaan halvempi [25].
- Rakenne toimii tulipalossa perinteistä kattoa paremmin vähentäen palon leviämisen riskiä ullakolle (kun kyseessä on ullakkotilallinen rakenne) [27].

Tuulensuoja-aluskaterakenteessa ilmatiiveys toteutetaan perinteisen rakenteen tapaan sisäpuolisella ilmansulkukerroksella. Tämän lisäksi rakenteen ilmatiiveyttä parantaa ilmatiiviisti asennettu aluskate rakenteen ulkopinnassa. Kun perinteisessä aluskatteen alapuolelta tuuletetussa rakenteessa ilmatiiveys on yhden ilmansulkukerroksen, tavalli-

sesti höyrynsulun, varassa, niin tuulensuoja-aluskaterakenteessa ilmatiiveyteen vaikuttaa kaksi rakennekerrosta. Tämä johtaa siihen, että ilmavirtausten määrää rakenteen läpi vähenee verrattuna perinteiseen rakenteeseen.

Rakenteen läpi menevien ilmavirtausten mukana saattaa kulkeutua merkittäviä määriä kosteutta ja lämpöenergiaa. VTT:n tekemässä tutkimuksessa todettiin tuulensuoja-aluskaterakenteen vähentävän vuotoilmavirtoja jopa 14 % verrattuna perinteiseen tuuletettuun ullakkotilalliseen yläpohjarakenteeseen, kun lämmöneristeenä oli 250 mm mineraalivillaa ja ullakkotila oli ilmatiiveydeltään ideaalinen. Tällöin kokonaislämpöhäviöt yläpohjan läpi pienenevät noin 25 % verrattuna tuuletettuun ullakkorakenteeseen. [21] Tutkimuksessa lämmitysenergian säästö koski sellaista rakennetta, jossa aluskate on asennettu ilmatiiveydeltään ideaalisesti. Käytännössä ilmatiiveyttä ei saada täydellisen tiiviiksi, joten lämmitysenergian säästö on todellisuudessa pienempi.

Lämmöneristeen suojaaminen kylmän ilman vaikutuksilta parantaa lämmönerityksen toimintaa. VTT:n tutkimuksen mukaan tuulensuoja vähentää rakenteen lämpöhäviöitä 2-4 %. [21]

Tuulensuoja-aluskaterakenteessa aluskatteen alapuolella ei ole tuuletusväliä. Tämä tekee rakenteesta yksinkertaisemman, jolloin se on helpompi rakentaa, kun kattokannattajien välin voi täyttää kokonaan lämmöneristeellä eikä tuuletusväliä tarvitse tehdä. Tällöin rakenteesta tulee myös ohuempi. Tuuletusvälin korkeus on perinteisessä tuuletetussa rakenteessa ollut vähintään 75 mm [5], mutta tavallisesti tuuletusvälin korkeudeksi on suositeltu 100 mm [20], [17]. Toisaalta tuulensuoja-aluskaterakenteessa aluskatteen yläpuolinen tuuletusväli (aluskatteen ja vesikatteen välinen tuuletusväli) tulee olemaan hieman perinteistä kattoa korkeampi. Suositus tuuletusvälin korkeudeksi on 50 mm [26], kun se perinteisessä katossa on 20 - 50 mm [5]. Tällöin säästö rakenteen paksuudessa tulee olemaan kokonaisuudessaan 45 - 100 mm:ä verrattuna perinteiseen kattoon.

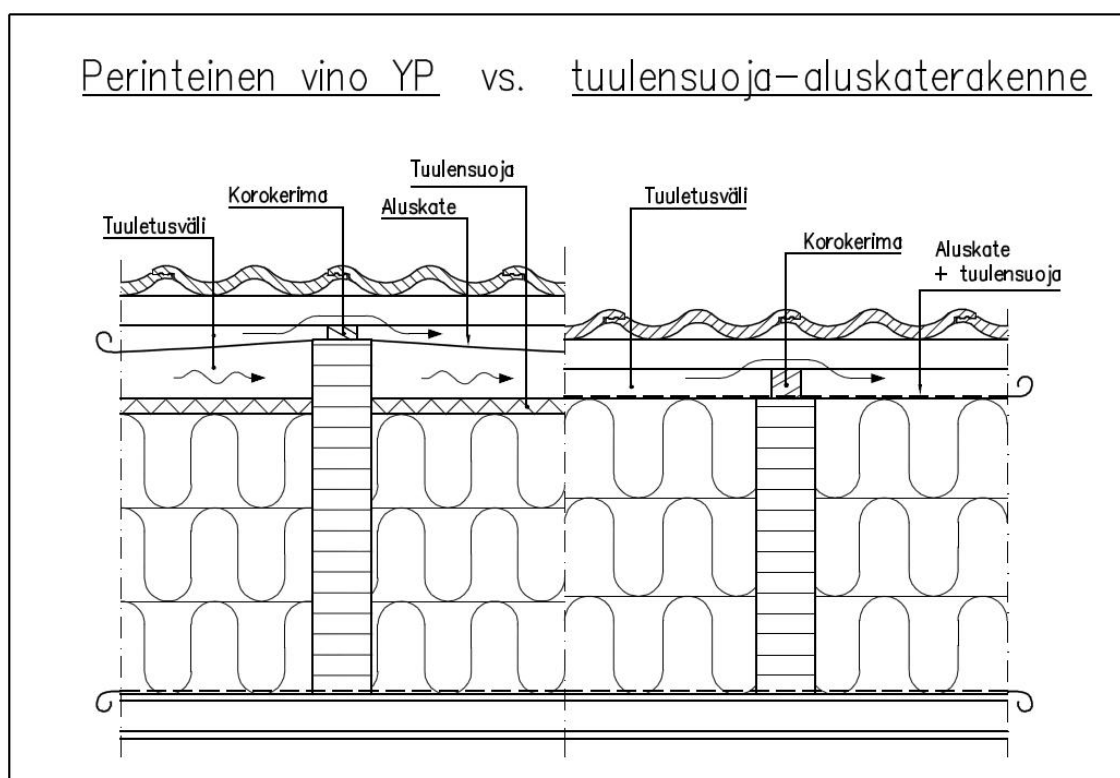
Tuulensuoja-aluskaterakenne on halvempi kuin perinteinen tuuletettu yläpohjarakenne. Riippuen rakentamistavasta säästöä voi tulla useasta eri syystä. Rakenteessa ei tarvita kahta erillistä rakennekerrosta tuulensuojalle ja aluskatteelle. Toisaalta vesihöyryavoin aluskate on ainakin tällä hetkellä vielä hieman tavanomaista vesihöyrytiivistä aluskatetta kalliimpi, joten rakennekerrosten yhdistäminen ei välttämättä tuo paljoa säästöä materiaalikustannuksissa. Lisäksi tuulensuoja-aluskaterakenteen yhteydessä on oleellista käyttää tarpeellisia tiivistystarvikkeita aluskatteen ilma- ja sadevedentiiveyden varmistamiseksi (ks. kappale 4.2.6), mikä lisää hieman rakennuskustannuksia. Säästö syntyykin lähinnä siitä, että tuulensuoja-aluskaterakenne on perinteistä tuuletettua yläpohjarakennetta yksinkertaisempi ja rakennepaksuudeltaan ohuempi. Tuulensuoja-aluskaterakenteessa voidaan käyttää esimerkiksi matalampaa kattokannattajaa tai hoiempaa puutavaraa tarvittavien rakennekerrosten tekemiseksi.

4.2.2 Tuulensuoja-aluskaterakenteen kuivumiskyky

Tuulensuoja-aluskaterakenteen kuivumiskyky on testattu kenttä- ja laboratoriotestein. Yläpohjarakenteen sisään päässyt ylimääräinen kosteus voi kuivua aluskatteen läpi diffuusiolla. Tehdyissä tutkimuksissa on todettu, että aluskate ei muodosta estettä katon kuivumiselle [24] ja että tuulensuoja-aluskaterakenteen kuivumiskyky on vähintään yhtä hyvä kuin perinteisen tuuletetun yläpohjarakenteen [24], [21].

4.2.3 Samankaltaisuus perinteiseen rakenteeseen

Tuulensuoja-aluskaterakenne sisältää kaikki samat toiminnalliset rakennekerrokset kuin perinteinen tuuletettu rakenne lukuun ottamatta tuuletusväliä aluskatteen alla. Tuulensuoja-aluskaterakenteessa on vesikate, tuuletusväli vesikatteen alla, aluskate, tuulensuoja, lämmöneriste ja höyrynsulku. Kuvassa (Kuva 10) on esitetty vertailun vuoksi rakenteiden leikkauskuvat.



Kuva 10: Perinteisen vinon yläohjan ja tuulensuoja-aluskaterakenteen samankaltaisuus. Rakenteet sisältävät samat toiminnalliset rakennekerrokset.

Perinteisessä aluskatteen alapuolelta tuuletetussa rakenteessa tuulensuojana on yleensä käytetty tavanomaisia tuulensuojamateriaaleja, kuten kosteudenkestävää jäykkää puukuitulevyä tai tuulensuojapintaista villaa [20]. Tuulensuoja-aluskaterakenteessa perinteinen tuulensuoja on korvattu vesihöyryvoimella tuulensuojalla, joka on lisäksi sadevesitiivis. Ja koska aluskate on vesihöyryvoin, niin kosteus pääsee poistumaan diffuusiolla aluskatteen läpi. Tällöin aluskatteen alapuolinen tuuletusväli voidaan jättää rakenteesta pois.

Tuulensuojan ja aluskatteen ominaisuudet on yhdistetty samaan rakennekerrokseen (sadevedentiiveys + tuulenpitävyys), jolloin voidaan puhua tuulensuoja-aluskaterakenteesta tai vinosta yläpohjasta, jossa on tuulensuoja-aluskate. Vesihöyryavoimen aluskatteen vesihöyrynläpäisevyys on samaa luokkaa tai hieman suurempi kuin tavanomaisten tuulensuojien. Tavanomaiset tuulensuojamateriaalit eivät ole kuitenkaan sadevedentiiviitä, kun niitä käytetään yläpohjassa.

Tuulensuoja-aluskaterakenteessa voi havaita samankaltaisuutta myös tavanomaiseen ulkoseinärakenteeseen. Molemmista rakenteista löytyy ulkoverhous, tuuletusväli, tuulensuoja, lämmöneriste ja höyrynsulku. Kattorakenteessa vedenpitävyyteen on kiinnitetty vain enemmän huomiota kuin seinärakenteessa.

4.2.4 Aluskatteelta vaadittavat palo-ominaisuudet

Suomessa Rakennusmääräyskokoelman osassa E1 esitetään rakennusmateriaaleilta vaadittavia palo-ominaisuuksia. Yläpohjan tuuletusväli on ontelo, jossa yläpohjan yläpintana on tuulensuoja-aluskate. P1 ja P2 luokan rakennuksissa yläpohjan yläpinnalla rakennusmateriaalin tulee kuulua luokkaan B-s1, d0. P3 luokan rakennuksissa tuulensuoja-aluskatemateriaalilla ei ole paloluokkavaatimusta.

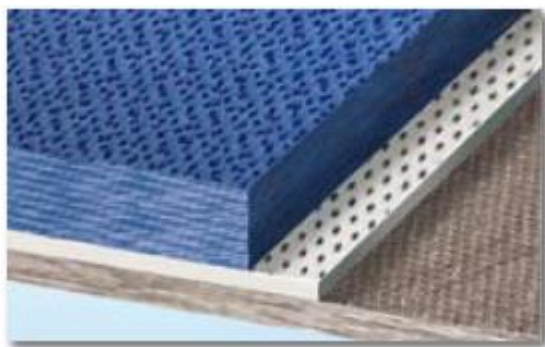
4.2.5 Aluskatteen materiaaliominaisuudet

Diffuusioavoimen aluskatteen vesihöyrynläpäisevyys on hyvin suuri. Sen s_d -arvo on luokkaa 0,02 - 0,05 m. Samalla aluskate on kuitenkin myös vesitiivis. Nämä ominaisuudet johtuvat aluskatemateriaalin rakenteesta, joka päästää lävitseen vesihöyryn, muttei nestemäistä vettä sen pintajännityksen johdosta (Kuva 11). Tämänlainen toiminta voidaan saada aikaan usealla tavalla.



Kuva 11: Periaatekuva aluskatteen toiminnasta. Diffuusioavoin kalvo päästää lävitseen vesihöyryn, muttei nestemäistä vettä sen pintajännityksen johdosta [7].

Diffuusioavoin aluskate voi koostua useasta materiaalikerroksesta, jotka on laminoitu kerroksittain. Tavallisesti useammasta kerroksesta koostuvassa aluskatteessa on ulommaisina kerroksina polypropeenista valmistettu luja vedenpitävä ja vesihöyryä läpäisevä huopamainen kuitukangas, joiden väliin on laminoitu vesihöyrynläpäisevä ohut kalvo (Kuva 12).



Kuva 12: Periaatekuva aluskatteen rakenteesta. Aluskate voi koostua useasta eri ainekerroksesta, jotka laminoidaan yhteen. [28]

Vesihöyrynläpäisevä ohut kalvo voidaan valmistaa esimerkiksi polypropeenista tai mikrohuokoisesta polyeteenistä. Se on herkkä vaurioille ja siksi se yleensä laminoidaan lujien kerrosten väliin. Aluskatteen lujuutta voidaan lisätä entisestään käyttämällä aluskatteen rakenteessa esimerkiksi polypropeenista valmistettua vahvistusverkkoa. Aluskate voi koostua myös yksittäisestä materiaalikerroksesta. Tällöin aluskate voi koostua esimerkiksi polyolefiinikuiduista [7].

Muita diffuusioavoimen aluskatteen tärkeitä ominaisuuksia veden- ja tuulenpitävyyden sekä vesihöyrynläpäisevyyden lisäksi ovat vetolujuus, repäisylujuus, taivutettavuus (erityisesti kylmässä), dimensiostabiliteetti, vanhenemisominaisuudet ja kondenssinsitomiskyky. Lisäksi aluskatteella ei saa olla niin sanottua telттаefektiä. Telттаefektillä tarkoitetaan sitä, ettei vesi pääse aluskatteen läpi, kun aluskate on asennettu suoraan lämmöneristeen tai muun alustan päälle. Telттаefektillä viitataan hyvin tunnettuun ilmiöön, jossa kosketus telttakankaan sisäpintaan sateen aikana johtaa veden tunkeutumiseen kankaan läpi. Tässä esitetyt aluskatteiden tärkeimmät ominaisuudet sisältyvät vapaasti asennettävien aluskatteiden luokitukseen, joka on esitetty lähteessä [17]. Luokituksessa on esitetty testimenetelmät eri ominaisuuksien testaamiseksi sekä raja-arvoja useimmille ominaisuuksille. Luokituksessa ei ole kuitenkaan huomioitu aluskatteen telттаefektiä, joka on tuulensuoja-aluskaterakenteessa aluskatteen olennainen ominaisuus. Tuulensuoja-aluskaterakenteessa tulisikin käyttää ainoastaan aluskatteita, joilla ei esiinny telттаefektiä. Telттаefekti voidaan testata testimenetelmällä NT Build 488 ”Roof tile underlays: watertighness – Tent Effect” [29].

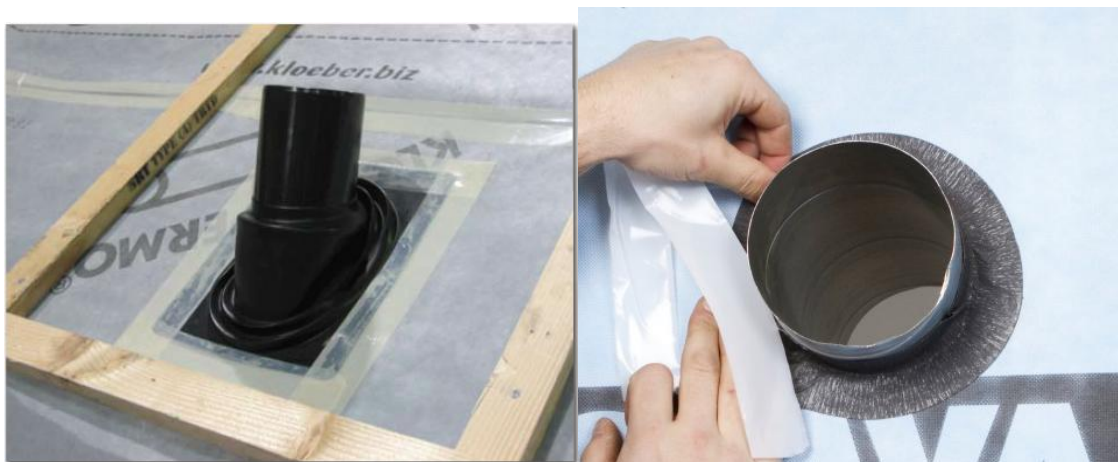
4.2.6 Aluskatteen tiivis asentaminen

Yläpohjarakenteen hyvän kosteusteknisen toiminnan edellytyksenä on se, että aluskate asennetaan veden- ja ilmanpitävästi. Vedenpitävyyden merkitys korostuu sitä enemmän, mitä loivemmille katoille aluskate asennetaan. Aluskatteen ilmatiivis asentaminen tuo kosteusteknistä varmuutta ja vähentää lämmönhukkaa vähentämällä rakenteen läpi meneviä konvektiovirtauksia. Täydellinen ilmatiiveys voi olla vaikea toteuttaa, mutta hyvään ilmatiiveyteen tulee pyrkiä, jotta varmistetaan rakenteen hyvä kosteus- ja lämpötekninen toiminta.

Aluskatteen tiivis asentaminen vaatii huomion kiinnittämistä rakenteen yksityiskohtiin. Aluskate itsessään on tiivis, joten rakenteen huomiota vaativia yksityiskohtia ovat aluskatteen saumat, katon reunat ja läpiviennit. Näiden toteuttamiseksi tulee olla olemassa detaljipiirroksat, joissa esitetään yksityiskohtaisesti aluskatteen tiivis asentaminen ja tarvittavat tiivistystarvikkeet. Asentamisessa voidaan käyttää apuna tarpeen mukaan erilaisia erikoisteippejä, liimoja, massoja ja läpivientikappaleita.

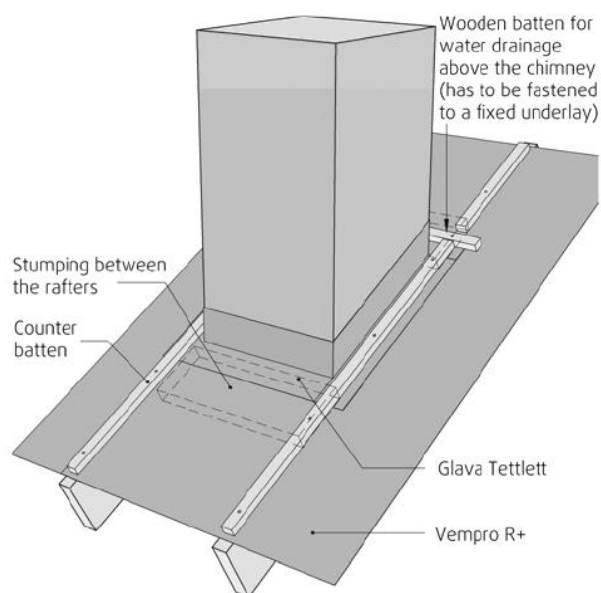
Ilma- ja sadevedentiivis yläpohjarakenne voidaan toteuttaa usealla tavalla. Tällä hetkellä on kuitenkin käytössä eräitä tyypillisiä ratkaisuja tiettyjen yksityiskohtien toteuttamiseen. Ratkaisut voivat ajan myötä muuttua ja aika näyttää mikä tulee olemaan paras tapa saavuttaa rakenteen riittävän hyvä tiiveys. Tässä on esitetty vain esimerkkejä tiivistystavoista ja tiivistystarvikkeista.

Aluskatteen **saumat** voidaan tehdä tiiviisti teippaamalla tätä tarkoitusta varten valmistetuilla erikoisteipeillä tai liimaamalla erityisellä liimalla. Monissa aluskatteissa onkin nykyisin valmiina teippi- tai liimaussauma. **Pienten läpivientien** kohdalla voidaan käyttää valmiita läpivientikappaleita (Kuva 13 vasemmalla), jotka tiivistetään aluskatteeseen. Läpivientien tekemiseen voidaan käyttää myös joustavaa teippiä (Kuva 13 oikealla), tiivistysmassaa tai -liimaa.



Kuva 13: Läpivientien tiivistämisessä käytetään apuna erilaisia tiivistystarvikkeita. Vasemmalla läpivientikappale teipattuna aluskatteeseen [28]. Oikealla läpiviennin tiivistäminen joustavan teipin avulla [30].

Suuret läpiviennit, kuten kattoikkunat ja savupiiput, voidaan tiivistää esimerkiksi tiivistysteipin tai liiman avulla. Kuvassa (Kuva 14) on esitetty eräs tapa tiivistää savupiippu aluskatteeseen.



Kuva 14: Savupiipun tiivistäminen aluskatteeseen teipin avulla [6]

Kattokannattajien päälle asennettavat korokerimat naulataan kattokannattajiin, jolloin aluskatteeseen tulee korokeriman alle **naulanreiät**. Jos aluskate on pullistunut ylöspäin kattokannattajien välissä esimerkiksi lämmöneristeen johdosta, niin vesi valuva vesi saattaa kulkea juuri korokerimojen kohdalta. Tällöin on tärkeää, ettei vesi pääse rakenteen sisään naulanreikien kautta. Tähän suositellaankin käytettäväksi korokerimojen alla joko erityistä tiivistysnauhaa, tiivistysteippiä tai tiivistysmassaa. Tiivistysteipin käyttäminen on esitetty kuvassa (Kuva 15)



Kuva 15: Erityisellä tiivistysteipillä voidaan tiivistää naulausreiät korokerimojen alla [31].

Aluskatteen tiiviiseen asentamiseen kuuluukin näin ollen oleellisesti erilaiset tiivistystarvikkeet. Näitä tarvikkeita tulisi olla saatavilla aluskatteen kanssa. Tällä hetkellä useilla aluskatevalmistajilla onkin tarjota erilaisia tiivistystarvikkeita käytettäväksi yhdessä aluskatemateriaalin kanssa. Työmaalla tiiviin lopputuloksen kannalta oleellisinta on, että aluskatteen asentajalla on käytettävissään selkeät detaljipiirustukset katon kaikista tarpeellisista kohdista. Detaljipiirustuksissa tulee esittää sekä aluskatteen asennus että tarvittavat materiaalit ja tarvikkeet.

5 TUULENSUOJA-ALUSKATERAKENTEEN KÄYTTÖ MUISSA EUROOPAN MAISSA SEKÄ AI- EMMIN TEHDYT TUTKIMUKSET

Tietoa rakenteen kosteusteknisestä toiminnasta saadaan teoreettisista tutkimuksista, laboratorio- ja kenttätutkimuksista sekä käyttökokemuksista. Kun arvioidaan uuden tai uudentyypisen rakenteen soveltuvuutta Suomeen, niin muualla saadut aikaisemmat käyttökokemukset tutkittavasta rakenteesta ovat tärkeää tietoa.

Tuulensuoja-aluskaterakenne ei ole Suomessa yleisesti käytössä. Tiedetään kuitenkin, että kyseinen rakenne on käytössä Keski-Euroopassa ja Pohjoismaista ainakin Norjassa. Tässä kirjallisuusselvityksessä keskitytään esittelemään näitä käyttökokemuksia ja tutkimustuloksia Saksasta, Isosta-Britanniasta, Norjasta, Ruotsista ja Suomesta. Kirjallisuusselvitys ei ole kattava ja tyhjentävä tutkimus tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttölaajuudesta ja tehdyistä tutkimuksista, vaan enemmänkin katsaus muutaman ennalta valitun maan tapaan käyttää tuulensuoja-aluskaterakennettä.

Useassa maassa on käytössä jonkinlainen rakennustuotteiden sertifiointijärjestelmä. Yleensä sertifikaatti takaa vähintään sen, että rakennustuotteella on luvatut materiaaliominaisuudet. Tämän lisäksi rakennustuotteilla voi olla sertifikaatti, joka takaa sen, että tuote sopii valmistajan sille kuvaamaan tarkoitukseen. Esimerkiksi aluskatetuotteella voi olla sertifikaatti, joka takaa sen, että tuotetta voi käyttää tuulensuoja-aluskaterakenteeseen jyrkillä puurakenteisilla katoilla. Tällöin sertifikaatin myöntäjä yleensä tarkistaa, että rakenne jossa aluskatetuote on osana täyttää paikallisten rakennusmääräysten vaatimukset. Eri maissa on yleensä omat sertifiointiin erikoistuneet yhtiöt tai tutkimuslaitokset. Tässä selvityksessä sertifikaatilla tarkoitetaan rakenteen sertifikaattia, joka takaa sen, että aluskatetuotetta voi käyttää tuulensuoja-aluskaterakenteessa ja tuulensuoja-aluskaterakenne täyttää kansalliset rakennusmääräykset.

5.1 Ilmastolliset erot

Ilmasto on erilainen eri maissa, mistä johtuen myös tarkasteltavan rakenteen kosteusraitus on erilainen eri maissa. Siksi tämän selvityksen tuloksia tulee tarkastella niiltä osin kriittisesti. Toisaalta ilmastolliset erot aiheuttavat sen, että ilmasto toisessa maassa voi olla Suomen ilmasto kriittisempi riippuen siitä mitä ilmiötä tarkastellaan. Esimerkiksi homeenkasvua tarkastellessa kriittisempi ilmasto on se, jossa on homeelle otolliset kasvuolosuhteet pidemmän aikaa. Ruotsin ja Norjan ilmastolliset erot ovat Suomeen verrattuna pienemmät kuin erot Saksaan tai Iso-Britanniaan. Ruotsin ilmasto eroaa Suomen

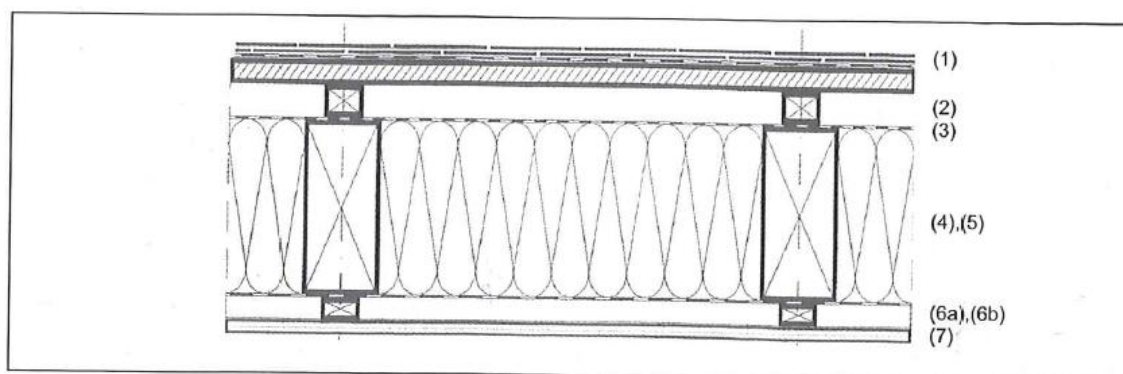
ilmastosta kaikkein vähiten. Siellä ilmastolliset erot Suomeen verrattuna ovat suurimmillaan Etelä-Ruotsissa. Talvet ovat Etelä-Ruotsissa leudompia ja syksyisin on pitkään lämmintä ja kosteaa. Pitkä lämmin ja kostea vuodenaika synnyttää homeenkasvulle otolliset olosuhteet. On arvioitu, että ilmastomuutoksen vaikutuksesta Suomessa homeen kasvulle otolliset olosuhteet rakenteissa tulevat lisääntymään [32]. Näin Suomen ilmastosta tulee enemmän Etelä-Ruotsin ilmaston kaltainen.

Norjassa lämpötilan vaihteluväli, tuulennopeus ja sademäärä ovat paikoin suurempia kuin Suomessa. Näin ollen ilmasto voi olla Norjassa paikallisesti Suomen ilmastoa ankarampi. Esimerkiksi tuiskuava lumi voi päästä rakenteiden sisään tuuletusraoista. Lämpötila voi olla joillakin alueilla pitkään hyvinkin alhainen. Tällöin rakenteisiin kondensoituvan kosteuden määrä on suurin verrattuna muihin vuodenaikoihin. Tästä johtuen Norjan ilmasto on kosteuden kondensoitumisen osalta Suomen ilmastoa kriittisempi.

Saksassa ja Isossa-Britanniassa ilmasto on yleisesti Suomen ilmastoa leudompi. Toisaalta Saksassa ilmasto on maan laajan pinta-alan ja suurien korkeuserojen vuoksi myös vaihtelevampi kuin Suomessa. Isossa-Britanniassa taas sademäärät ovat suuria, joten siellä on pitkään kosteaa. Tämä tarkoittaa rakennusfysikaalisesti sitä, että Saksassa ja Isossa-Britanniassa, kuten myös Etelä-Ruotsissa ilmasto on homeen kasvun kannalta Suomen ilmastoa kriittisempi.

5.2 Saksa

Saksassa tuulensuoja-aluskaterakennetta on tutkittu ainakin jo 1980-luvun lopulla. Rakenne on nykyään siellä hyvin tunnettu ja diffuusioavoimia aluskatteita on saatavilla monelta eri valmistajalta. Rakenne täyttää DIN-normin rakennusfysikaaliset vaatimukset ja se on esitetty saksalaisessa rakennusfysiikan käsikirjassa [33] esimerkkirakenteena vinosta katosta, jossa ei muodostu räystäälle jääpuikkoja (Kuva 16).



Kuva 16: Tuulensuoja-aluskaterakenne. 1) Vesikate, 2) Tuuletusväli, 3) Aluskate, 4) Lämmöneristys, 5) Kattokannattajat, 6a) Diffuusiotiivis kerros, 6b) Ilmatiivis kerros, 7) Sisäverhous [33]

Saksassa valtakunnallinen kattoliitto (ZVDH) on antanut ohjeita diffuusioavoimen aluskatteen käytölle. Aluskatteilla on luokitus, joka perustuu niiden materiaaliominaisuuksiin sekä asennustapaan. Asennustavan mukaan aluskatteet jaetaan kahteen luok-

kaan: Vapaasti asennettavat aluskatteet (USB) ja alustalle asennettavat aluskatteet (UDB). Alustana voi toimia esimerkiksi lämmöneristys tai levytys. Aluskate voi kuulua yhtä aikaa molempiin luokkiin. Luokkien tarkemmat määritykset ja aluskatteiden materiaalivaatimukset löytyvät lähteistä [34] ja [35]. Luokitus on samankaltainen kuin Suomessa Kattoliiton tekemä luokitus. Siinä otetaan huomioon aluskatteen seuraavat ominaisuudet: paloluokka, vetolujuus, venymä, repäisyjujuus, kylmätaivutuskestävyys, aluskatteen käyttölämpötila-alue, viistosadekestävyys, vanhenemisominaisuudet, käyttö rakennusaikaisena suojana ja aluskatteeseen sopivien tiivistystarvikkeiden saatavuus. Siinä ei kuitenkaan määritellä raja-arvoa vesihöyrynläpäisevyydelle. Tästä onkin Saksassa useita eri tulkintoja, mikä on vesihöyrynläpäisevyyden raja-arvo diffuusioavaimelle aluskatteelle.

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 9) on vertailtu eräässä tutkimuksessa kerättyjä erilaisia raja-arvoja vesihöyrynläpäisevyydelle. Taulukkoon on haettu s_d -arvoja eri lähteistä.

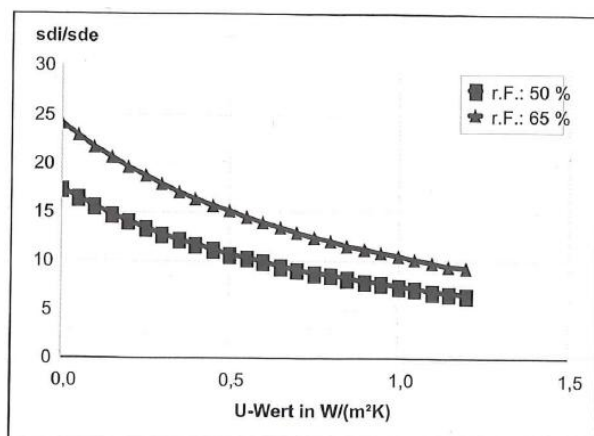
Taulukko 9: S_d -arvojen raja-arvoja aluskatteille ja höyrynsulkukalvoille. Taulukkoon on kerätty raja-arvoja eri lähteistä [36]

Autor/ Veröffentlichung	s_d -Werte [m]	Bezeichnung der Diffusionsoffenheit	Material	Anwendung und Bemerkungen
ZVDH [31]	0,3	diffusionsoffen	diffusionsoffene Werkstoffe	Über Wärmedämmung
DIN 4108-3	$\leq 0,5$	diffusionsoffen	-	die Wasserdampfdiffusion betreffende Schicht
	0,5 - 1500	diffusionshemmend		
	≥ 1500	diffusionsdicht		
DIN 68800-2 Prof. Schulze [N9][39]	$\leq 0,2$	diffusionsoffen	Verschiedene Baustoffe	Schichten die Holzquerschnitte umgeben zur Einteilung in Gefahrenklassen den Holzschutz betreffend
	$\leq 0,02$	extrem diffusionsoffen		
Dr. Künzel [25]	$< 0,1$	extrem diffusionsoffen	Unterspann- Unterdeckbahnen	Dachbereich Bauphysikalische Betrachtung
	$< 0,3$	diffusionsoffen		
Prof. Gertis [9]	$\leq 0,5$	diffusionsoffen	Dichtungsbahnen	-
Prof. Hens [13]	2-5	-	Dampfsperren	Im Dachbereich - Einteilung erfolgte nach Dachaufbau, Belüftung, und Feuchteproduktion innerhalb des Gebäudes
	5-25	-		
	25-200	-		
	> 200	-		
Wagner [45]	$< 0,1$	diffusionsoffen	Unterspannbahnen	Holzschutz betreffend
Klopfer [30]	0,1 - 0,3	diffusionsoffen	Gilt für Beschichtungen, Abdichtungen, Bodenbeläge; Bereich zw. 0,3 - 10 m Bereich f. konventionelle Bauteile	
	0,3 - 10	Keine spezielle Bezeichnung		
	10 - 100	Dampfbremsen		
	100 - 1000	Dampfsperren		
Worch [51]	0,2	diffusionsoffen	Kalkzementputz	Genannte Kategorien bei Versuchsbeschreibung
		extrem diffusionsoffen	Mineralwolldämmstoff	
WTA Merkblatt	$< 0,5$	diffusionsoffen	Beschichtungen	Fachwerkh Holzbauteilen betreffend
Weber [50]	$< 0,1$	wasserdampfdurchlässig, mikroporös	Beschichtungen	Einsatz auf mineralischen Untergründen
	0,1 - 0,5	wasserdampfdurchlässig		
	0,5 - 2,0	wasserdampfbremsend		
	$> 2,0$	wasserdampfdicht		
Walter [47] WDD[g/m²h]	$< 5,5$	sperrend	Anstriche	Einsatz auf mineralischen Untergründen
	$< 13,3$	hemmend		

Taulukosta nähdään, että raja-arvo diffuusioavaimelle materiaalille vaihtelee riippuen käytetystä lähteestä. S_d -arvon raja-arvo diffuusioavaimelle materiaalille vaihtelee taulu-

kossa 0,1 ja 0,5 metrin välillä. Lisäksi aluskate voidaan luokitella erittäin hyvin vesihöyryä läpäiseväksi, jolloin sen s_d -arvon raja-arvo on välillä 0,02 – 0,1 m riippuen käytetystä lähteestä. Saksan kattoliiton suositus s_d -arvon raja-arvoksi on 0,3 m ja DIN normissa 4108-3 raja-arvo on 0,5 m.

Aluskatteen vesihöyrynläpäisevyydestä määrätään DIN-normissa siten, että aluskatteen alapuolisten kerrosten yhteenlasketun s_d -arvon suhde aluskatteen s_d -arvoon tulee olla tiettyjen raja-arvojen mukainen. Vaadittava suhde riippuu rakenteen U-arvosta kuvan (Kuva 17) mukaisesti. Toisin sanoen rakenteen ulkopinnan tulee olla vesihöyrynläpäisevyydeltään avoimempi kuin rakenteen sisäpinnan. Se, kuinka paljon avoimempi, riippuu rakenteen U-arvosta ja sisäpuolen vesihöyrynläpäisevyydestä. [33]



Kuva 17: Vaadittavan suhteen s_{di}/s_{de} riippuvuus rakenteen U-arvosta. s_{di} = aluskatteen alapuolisten kerrosten yhteenlaskettu s_d -arvo; s_{de} = aluskatteen s_d -arvo. [33]

Diffuusioavointa aluskatetta markkinoidaan käytettäväksi erityisesti tiili- ja liuskekivikattojen aluskatteena. Saksan kattoliitto on antanut tiili- ja liuskekivikatoille suositellut vähimmäiskaltevuudet. Liuskekivikatoille vähimmäiskaltevuus on 22°-30° riippuen liuskekivityypistä ja limitystyylisestä [37]. Tiilikatoille vähimmäiskaltevuus on 22° - 40° riippuen tiilien limitysurituksesta (huulloksesta), tiilityypistä sekä limitystyylisestä [38]. Vähimmäiskaltevuuksista voidaan kuitenkin poiketa, mikäli erityisin *lisätoimenpitein* varmistetaan katon vedeneristyksen toimivuus. Lisätoimenpiteet voidaan kohdistaa aluskatteeseen, jolloin sen vedeneristystä voidaan parantaa muun muassa seuraavilla lisätoimenpiteillä:

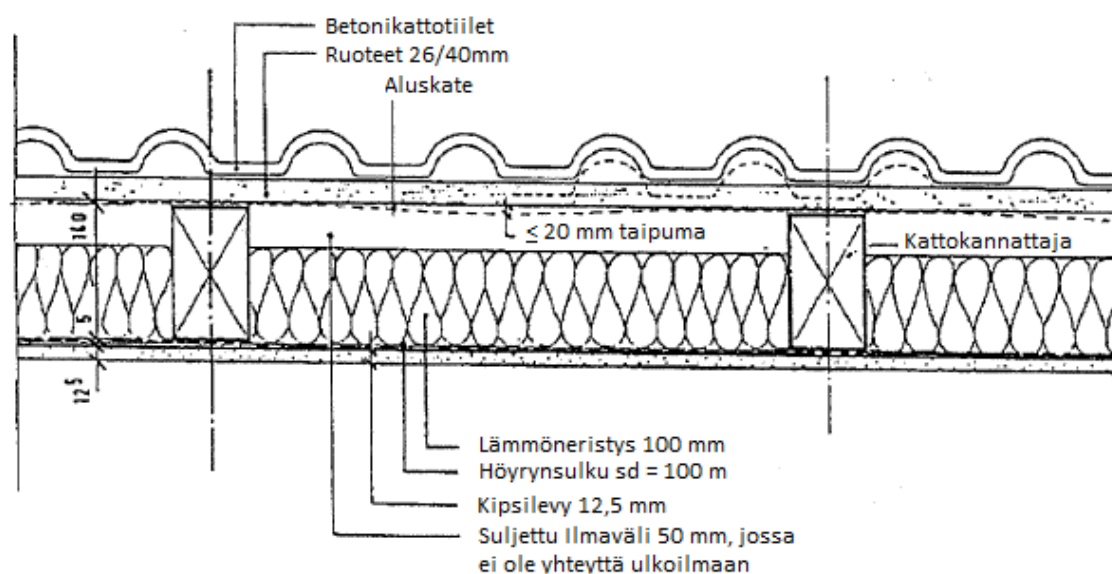
- Aluskatteen asettaminen alustalle, esimerkiksi lämmöneristeen tai levytyksen päälle.
- Aluskatteen tiivistäminen liitosten ja lävistysten kohdalta tarpeellisin tarvikkein, kuten naulanreikien tiivistäminen siihen tarkoitettulla teipillä tai liimalla ja läpivientien tiivistäminen läpivientikappaleilla ja/tai teipillä.
- Vesitiiviin alusrakenteen käyttäminen, esimerkiksi bitumikermin.

Se, miten vaativia tai laajoja lisätoimenpiteitä on tarpeen tehdä, riippuu katon luokasta (Luokitus 1-6, joista 1 on vaativin). Katon luokitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat [28]

- rakennuksen käyttö
- katon suositellun kaltevuuden alittaminen
- rakenne (erityisrakenteet ja katon monimuotoisuus)
- ilmasto ja
- paikalliset määräykset.

Tuulensuoja-aluskaterakenne voidaan vaadittujen lisätoimenpiteiden puitteissa tehdä suositeltua kattokaltevuutta 8 astetta loivempaan, jolloin vähimmäiskaltevuus tiili- ja liuskekivikatoilla on 14° (1:4) [28]. Tällöin aluskatteena on käytettävä hyväksyttyä tuotetta ja aluskatteen liitokset ja läpiviennit on tiivistettävä asianmukaisin tarvikkein. Jos katon vähimmäiskaltevuutta (tiili- ja liuskekivikatoilla vähintään 22°) ei aliteta, niin lisätoimenpiteitä ei tarvita. Tällöin aluskate voidaan asentaa vapaasti, saumat voidaan tehdä limittämällä ja läpivientien kohdilla riittää, että aluskate muotoillaan ohjaamaan valuva vesi pois.

Fraunhoferin rakennusfysiikan instituutin tekemässä kenttätutkimuksessa Holzkirchenissä 1988–1989 mitattiin kattokannattajien kosteuspitoisuuksia kahden talven ajan. Tutkimuksessa vertailtiin kattokannattajien kosteuspitoisuuksia, kun rakenteen tuuletusta muuteltiin. Eräs tutkittava tapaus on esitetty kuvassa (Kuva 18)

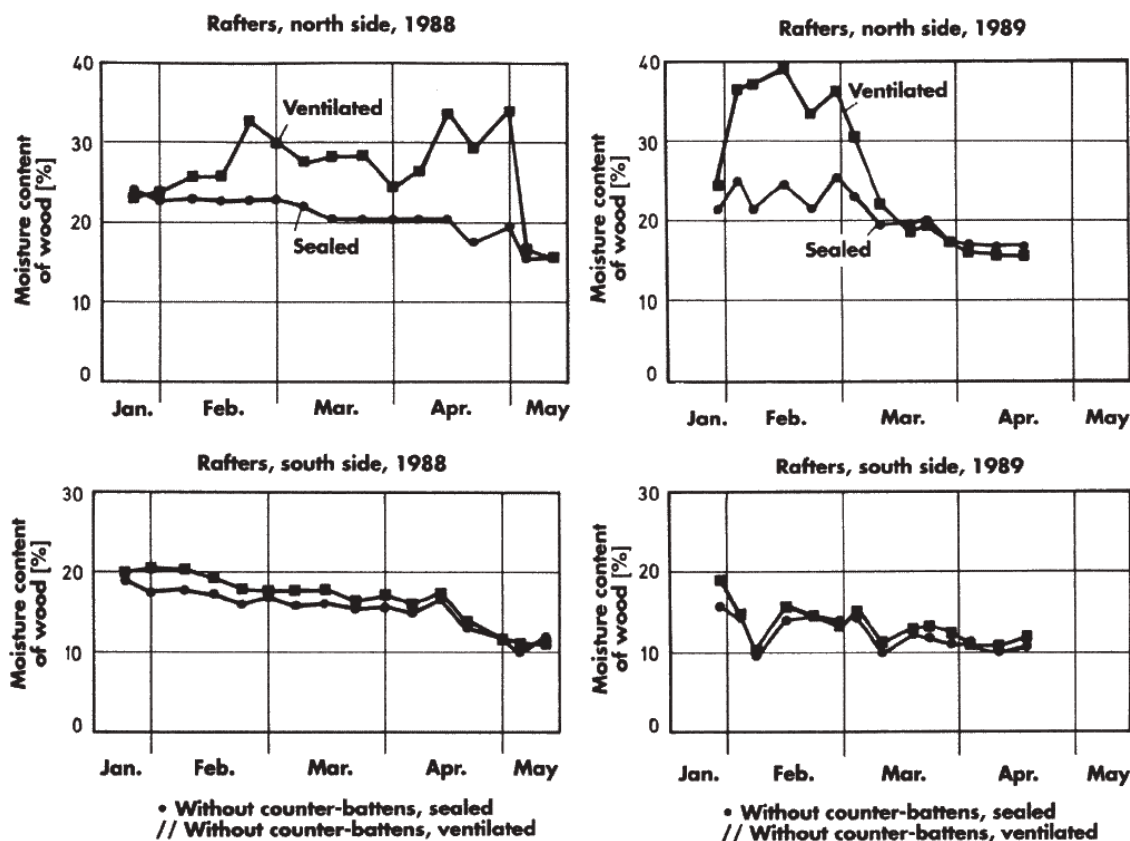


Kuva 18: Rakenne, jossa aluskatteen alapuolinen tuuletusväli on suljettu, eli tuuletusväli ei ole yhteydessä ulkoilmaan (alkuperäinen kuva lähteestä [39])

Kuvan tapauksessa aluskatteen alapuolinen tuuletustila suljettiin siten, ettei tuuletustilaan päässyt ulkoilmaa. Tutkitussa rakenteessa ei ole yhtenäistä tuuletusväliä varsinaisesti aluskatteen yläpuolellakaan, kun aluskatteen yläpuolelta puuttuvat kattokannattajien suuntaiset korokerimat. Tutkimuksessa verrattiin kattokannattajista mitattuja kosteuspitoisuuksia tapaukseen, jossa aluskatteen alapuolinen tuuletusväli oli yhteydessä ulkoilmaan. Tuuletetusta vertailurakenteesta puuttui kattokannattajien suuntaiset koro-

kerimat tuulettumattoman rakenteen tapaan. Tutkittavat rakenteet olivat vinoja kattoja, joissa kattokannattajien väli oli täytetty lämmöneristeellä.

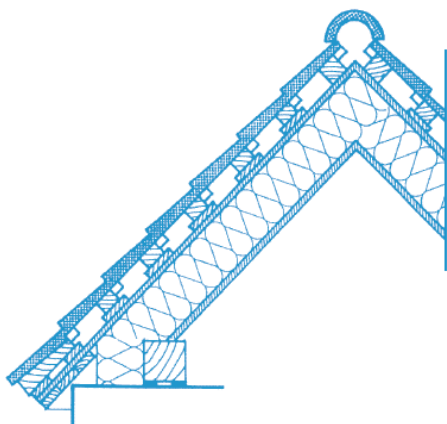
Tutkimuksessa kosteuspitoisuuksia mitattiin erikseen pohjois- ja eteläsuunnan kattolappeille, joiden kaltevuus oli 30°. Kosteuspitoisuuksia mitattiin kattokannattajista kahden talven ajalta vuosina 1988 ja 1989. Mittaustulokset on esitetty kuvassa (Kuva 19).



Kuva 19: Kattokannattajista mitattuja kosteuspitoisuuksia kahden talven ajalta Holzkirchenissä Saksassa [22].

Kuvasta nähdään, että tuulettumaton rakenne on pysynyt huomattavasti kuivempänä molempina talvina pohjoispuolen kattolappeella, kun taas eteläpuoleisella kattolappeella tuulensuoja-aluskaterakenteen kosteuspitoisuus on ollut vain hieman tuuletettua vertailukattoa alhaisempi.

Tutkimuksen perusteella ehdotettiin rakenneratkaisuksi kuvan (Kuva 20) mukaista rakennetta, jossa aluskatteen alla ei ole tuuletustilaa.



Kuva 20: Luonnoskuva tuulettumattomasta rakenteesta. Aluskate on asennettu suoraan lämmöneristeen päälle ja lämmöneriste on asennettu kattokannattajien väliin. Rakenteen sisäpuolen tulee olla ilmatiivis [39].

Tutkimuksen yhteenvedossa todetaan muun muassa, että käyttämällä riittävän difuusioavointa aluskatetta voidaan tuuletusväli jättää aluskatteen alapuolelta pois. Tällöin voidaan kattokannattajien väli täyttää kokonaan lämmöneristeellä ja näin saadaan aikaan optimaalisesti lämmöneristetty rakenne.[39]

Kommentit

Kuvassa (Kuva 19) on vertailtu aluskatteen alta tuulettumattoman ja tuuletetun rakenteen kattokannattajien kosteuspitoisuuksia. Aluskatteen alapuolelta tuuletetun rakenteen kattokannattajien kosteuspitoisuudet ovat pohjoispuolen kattolapella hyvin korkeita. Kun kosteuspitoisuuksia verrataan puun tasapainokosteuskäyrään (Kuva 2 s.11), niin voidaan todeta kosteuspitoisuuksien olevan hygroskooppisen alueen ulkopuolella. Tämä tarkoittaa sitä, että puuhun on imeytynyt kosteutta vapaasta vedestä, joka saattaa olla peräisin esimerkiksi ilmankosteuden kondensoitumisesta aluskatteen alapintaan. Rakenteen kosteuspitoisuudet ovat niin korkealla, että on perusteltua epäillä toimisiko rakenne käytännössä vaurioitumatta. Kosteusmittausten tuloksia tulkittaessa on siten huomattava, että aluskatteen alapuolelta tuuletettu rakenne ei vastaa Suomessa rakennettavaa tyypillistä aluskatteen alapuolelta tuulettua rakennetta.

Tutkimuksen tulokset näyttävät selvästi sen miten suuri vaikutus ulkoilman kosteu-
della voi olla Keski-Euroopassa.

5.3 Sveitsi

Tuulensuoja-aluskaterakenne on ollut Sveitsissä tavanomainen rakenne jo yli kymmenen vuotta. Sen käyttöä suositellaan perinteisen aluskatteen alapuolelta tuuletetun rakenteen sijaan. Aikaisemmin Sveitsissä vino yläpohja rakennettiin siten, että tuuletusväli oli sekä aluskatteen ala- ja yläpuolella, samoin kuin nykyään tehdään Suomessa. Perinteisen tuuletetun rakenteen haittana pidettiin sitä, että aluskatteen alapintaan saattoi muodostua kosteuden kondensoitumista. Tällöin vesi saattoi valua aluskatteen alapintaa pitkin.

Aluskatteen alapuolinen tuuletusväli oli tarpeen silloin, kun käytettiin vesihöyrytiiviitä aluskatteita, kuten bitumikermialuskatteita.

Sveitsissä tuulensuoja-aluskaterakennetta voi käyttää samoin kuin perinteistä tuuletettua rakennetta. Erityisiä rajoituksia tuulensuoja-aluskaterakenteen käytölle ei ole verrattuna perinteiseen tuuletettuun rakenteeseen. Sveitsissä on kuitenkin rajoituksia aluskatteelle silloin, kun katto on tarpeeksi loiva ja kun rakennus sijaitsee tarpeeksi korkealla merenpinnasta mitattuna. Tällöin aluskatteen saumat tulee hitsata tai liittää kemiallisesti (pelkkä saumojen teippaus ei riitä).

Aluskatteen saumat voidaan hitsata joko kemiallisesti tai lämmöllä. Joskus rakennuksen aluskate tehdään valmiiksi jo ennalta aluskatevalmistajan toimesta. Tällöin aluskate asennetaan työmaalla rakennukseen kuten sadetakki.

Tiedot tuulensuoja-aluskaterakenteen käytöstä Sveitsissä perustuvat lähteeseen [40].

5.4 Iso-Britannia

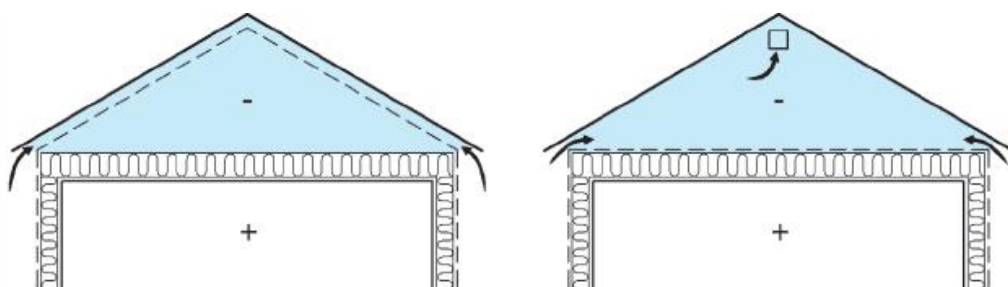
Diffuusioavoin aluskate (Vapour permeable underlay = VPU) on Isossa-Britanniassa suhteellisen tuore innovaatio. Sen käyttökohde on erityisesti kylmät ullakkotilalliset katot, joita Isossa-Britanniassa on 80 % kaikista asuintalojen katoista [41]. Tuulensuoja-aluskaterakennetta voidaan Isossa-Britanniassa käyttää vinoissa katoissa sekä tietyin edellytyksin ullakkotilallisissa yläpohjissa.

Ison-Britannian rakennusmääräyksissä (British Standards) aluskatteet jaetaan kahteen luokkaan: vesihöyrytiiviisiin (type HR) ja hyvin vesihöyryä läpäiseviin (type LR) aluskatteisiin. Diffuusioavoin aluskate on määritetty Ison-Britannian standardissa BS 5250:2002 (The Control of Condensation in Buildings). Sen mukaan aluskate luokitellaan vesihöyryä hyvin läpäiseväksi (type LR), jos sen vesihöyrynvastus (Z_p) on pienempi kuin 0,25 MNs/g (vastaa s_d -arvoa 0,05 m). [41] Standardissa BS5250:2002 ohjataan miten rajoitetaan sisäpuolelta tulevan kosteuden kondensoitumisen määrää rakenteisiin. Standardissa on käsitelty erikseen ullakkotilallinen katto ja vino katto. Standardin mukaan ullakkotilallisessa katossa voidaan sisäpuolelta tulevan kosteuden kondensoitumisen haitallisia vaikutuksia ehkäistä tuulettamalla ullakkotilaa [42]. Tämä pätee myös silloin, kun aluskatteena on hyvin vesihöyryä läpäisevä aluskate. Standardi ei siten suoraan kata tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttöä ullakkotilallisissa katoissa. Siinä on kuitenkin maininta, että mikäli halutaan tehdä kokonaan tuulettumaton ullakkotila, niin aluskatteen toimivuudesta tulee olla kolmannen osapuolen myöntämä tekninen hyväksyntä (Technical Approval). [43] Iso-Britanniassa teknisen hyväksynnän kyseiselle rakenteelle on myöntänyt British Board of Agreement (BBA). Sertifikaatti on myönnetty aluskatetuotteille, ja se löytyykin useilta markkinoilla olevilta aluskatetuotteilta.

Vinossa katossa tilanne on toinen. Standardin mukaan vino katto voidaan rakentaa tuulettumattomana, kun käytetään hyvin vesihöyryä läpäisevää aluskatetta. Silloin aluskatteen ja vesikatteen väli tulee olla hyvin tuulettuva. Sisäpuolisen kosteuden pääsy

rakenteeseen estetään tekemällä sisäpuolinen ilmansulku *hyvin tiiviisti*. [42] Tässä termi ”hyvin tiivis” on määritetty standardissa ja se tarkoittaa ilmansulkua, jossa mahdolliset ilmapuotorat on tiivistetty. Erityisesti tässä tarkoitetaan ullakkotiloihin johtavia luukuja, seinän ja katon liitoskohtia, valaisinasennuksia, sähköjohtoja ja muita läpivientejä. Standardissa on annettu kattoluukuille ja valaisinupotuksille suurimmat sallitut ilmanvuotoluvut ($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$). Muut läpiviennit on tiivistettävä pysyvästi käyttäen tarkoitukseen sopivia tarvikkeita. [44]

BRE:n tutkimuslaitos on julkaissut Isossa-Britanniassa rakennusohjeen (lähde [26]), joka käsittelee ullakkotilallisen yläpohjan rakentamista joko tuulettumattomana, eli tuulensuoja-aluskaterakenteena tai tuuletettuna yläpohjarakenteena (Kuva 21).



Kuva 21: Tuulettumaton ullakkotila, jossa tuulensuoja-aluskate (vasemmalla) ja tuulettu ullakkotila (oikealla) [27].

Ohje suosittelee tuulensuoja-aluskaterakenteessa käytettäväksi tuuletusväliä aluskatteen ja vesikatteen välissä. Tuuletusvälin korkeudeksi suositellaan tavallisesti 50 mm, ja vähintään 25 mm. Ohjeen mukaan tuulensuoja-aluskaterakenteen ei ole todettu lisäävän kondenssin riskiä tai kosteuspitoisuuden lisääntymistä ullakon puurakenteissa. Päinvastoin, ohjeessa sanotaan, että tietyissä tapauksissa tuulensuoja-aluskaterakenteen on todettu olevan jopa parempi kuin tavanomaisen kattorakenteen. [26]

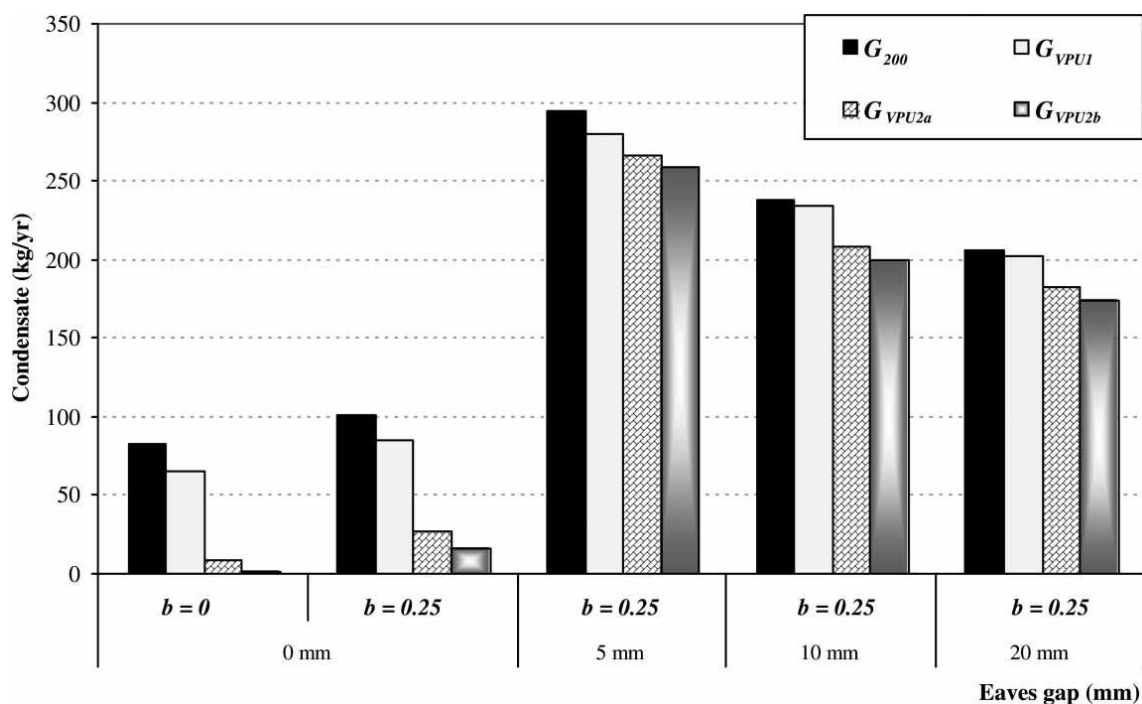
Glasgow Caledonianin yliopiston ja Ruotsin Chalmersin teknillisen yliopiston yhteisessä tutkimuksessa rakennetta tutkittiin rakennusfysikaalisen laskennan keinoin [41]. Tutkimuksessa laskentatyökaluna käytettiin HAM-tools:a. Tutkimuksessa pyrittiin määrittämään ne tekijät, joilla on vaikutusta ullakkotilaan kondensoituneen veden määrään ja vertailemaan näitä tekijöitä. Eri laskentatapaukset suunniteltiin siten, että eri muuttujien vaikutus tulee hyvin esille. Tutkimuksessa mallinnettiin neljä erilaista tapausta, joilla pyrittiin erottamaan eri muuttujien vaikutukset toisistaan:

- Tapaus 1: Perinteinen tiivis bitumihuopa-aluskate ($s_d > 25$ m) korvataan diffuusioavoimella aluskatteella, jonka vesihöyrynläpäisevyys vaihtelee suhteellisen kosteuden mukaan (s_d -arvo vaihtelee välillä 0,44...0,55 m).
- Tapaus 2: Ullakon tuulettu rajoitetaan pienentämällä tuuletusrakojen korkeutta.
- Tapaus 3: Talon asukaslukua lisätään kahdesta viiteen, mikä vaikuttaa sisäilman kosteuslisään.

- Tapaus 4: Käytetään aluskatteena hyvin vesihöyryä läpäisevää aluskatetta. Kaksi eri aluskatevaihtoehtoa ($s_d = 0,032$ m ja $s_d = 0,02$ m).

Mallissa otettiin lisäksi huomioon rakennuksen vaipan tiiveys (n_{50} -arvo) ja yläpohjan tiiveys alapuolella oleviin asuintiloihin nähden (kerroin b [Kuva 22]). Yläpohjan tiiveyden vaikutuksella pyrittiin ottamaan huomioon sisäilman mahdolliset vuodot ullakkotilaan.

Lasketatapauksen (Tapaus 4), jossa tutkittiin aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden vaikutusta, tulokset on esitetty seuraavassa kaaviokuvassa (Kuva 22). Kuvassa on esitetty aluskatteen alapintaan kondensoituneen veden määrä, kun käytetään eri aluskatemateriaaleja, ja kun ullakkotilan tuuletusrakojen korkeutta muutetaan.



Kuva 22: Aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden vaikutus kondensoituneen kosteuden määrään. Kerroin b esittää sitä, kuinka suuri osa koko rakennuksen ilmavuodoista taapautuu yläpohjan läpi. Aluskatemateriaalit on merkitty erilaisin rasteroinnein: G_{200} on perinteinen tiivis bitumihuopa-aluskate ($s_d = 40$ m), G_{VPU1} on aluskate, jonka vesihöyrynläpäisevyys muuttuu suhteellisen kosteuden mukaan ($s_d = 4,4...0,55$ m), G_{VPU2a} on diffuusioavoin aluskate ($s_d = 0,032$ m) ja G_{VPU2b} on myös diffuusioavoin aluskate ($s_d = 0,02$ m)[41]

Kuvasta nähdään, että kondenssin määrä on pienin, kun käytetään diffuusioavointa aluskatetta ja ullakkotila on tuuletukselta täydellisesti suljettu. Kuvasta on myös huomattava, että tuuletusraon suurentaminen vähentää kondensoitumista, mutta vasta sen jälkeen, kun kondensoituminen on huomattavasti lisääntynyt ullakon tuulettumisen johdosta.

Tutkimuksen johtopäätöksissä todetaan diffuusioavoimien aluskatteiden käytöstä, että vesihöyryavoin aluskate toimii tehokkaimmin silloin, kun sen vesihöyrynläpäisevyys on mahdollisimman suuri ($s_d < 0,02$ m). Lisäksi todetaan, että diffuusioavoi-

men aluskatteen käytöstä saatavat hyödyt, kun ullakon tuuletusta rajoitetaan, saavutetaan vain siinä tapauksessa, että ullakon ilmatiiveyteen kiinnitetään huomiota koko rakentamisen ajan. Ilmatiiveyden onnistumisen epäiltiin kuitenkin olevan seikka, jota ei ehkä pystytä toteuttamaan nykyisillä rakennustavoilla Isossa-Britanniassa.

5.5 Tanska

Tanskassa diffuusioavoimia aluskatteita on ollut markkinoilla jo 1990-luvun loppupuolelta. Siellä rakennetta on tutkittu useissa eri tutkimuksissa. Tämän kappaleen teksti perustuu pääosin lähteeseen [29], jossa kerrotaan tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttämisestä Tanskassa.

Tanskassa puurakenteinen, jyrkkä katto on perinteisesti tehty tuuletettuna rakenteena. Aluskatteiden käyttö on ollut yleistä ja siinä tuuletusväli on ollut perinteisesti sekä aluskatteen alla että päällä. Aluskatetta on käytetty erityisesti vinoilla katoilla. Diffuusioavoimet aluskatteet tulivat Tanskassa markkinoille 1990-luvun loppupuolella. Niitä on käytetty perinteisestä rakennustavasta poiketen siten, että ne on asennettu suoraan lämmöneristeen päälle.

Tuulensuoja-aluskaterakenteen vähimmäiskaltevuus on Tanskassa 18° (1:3). Aluskatteen vesihöyrynvastuksen tulee olla enintään $3 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$, joka vastaa s_d -arvoa 0,55 m. Korokerimoina tulee käyttää teräväreunaista kyllästettyä puutavaraa, jonka vähimmäiskorkeus on 25 mm. [45] Lämmöneriste suositellaan Tanskassa jättämään 20 mm kattokannattajan yläpintaa alemmas. Tämä vara jätetään lämmöneristeen myöhemmää mahdollista laajenemista varten. [46], [47]

Pian diffuusioavoimien aluskatteiden saapumisen jälkeen Tanskassa käynnistettiin projekti selvittämään rakenteen ongelmakohtia ja asettamaan aluskatetuotteille tarvittavat materiaali vaatimukset. Projektin päähuomio kiinnitettiin rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Materiaaliominaisuuksista tärkeimpinä pidettiin seuraavia:

- Sadeveden tiiveys. Erityisesti silloin, kun aluskatetta käytetään rakennusaikaisena suojana.
- Vesitiiveys, kun vesi valuu aluskatteen pintaa pitkin.
- Ei saa olla niin sanottua telттаefektiä.
- Vesihöyrynläpäisevyys.
- Kosteutta varaavat ominaisuudet, kuten kosteutta sitova aluskatteen alapinta, mikä estää veden valumisen aluskatteen alapintaa pitkin. Nämä ovat täydentäviä ominaisuuksia silloin, kun muut katon vaatimukset on täytetty. Varastoitu kosteus voi poistua muina aikoina.
- Dimensio stabiilitetti, kun suhteellisen kosteuden arvo muuttuu.

Aluskaterakennetta tutkittiin useassa eri tutkimuksessa. Näitä olivat täyden mittakaavan kenttäkoe, rakennusfysikaalinen laskenta, laboratoriokokeet sekä kenttätutki-

mukset todellisissa rakennuskohteissa. Kenttäkokeessa tuulensuoja-aluskaterakennetta tutkittiin testitalossa. Kenttäkokeen teki Danish Buildin Research Institute (SBI). Testitalossa oli 11 paria kattoelementtejä, joista 10 parissa oli tuulensuoja-aluskaterakenne ja yksi oli niin sanottu referenssi rakenne, joka oli tuuletettu sekä aluskatteen alta että päältä. Testirakenteita tutkittiin kolmen vuoden ajan tammikuusta 1995 syyskuuhun 1997. Aluskatemateriaaleina käytettiin useita eri tuotteita. Kosteusmittausten mukaan kosteuspitoisuudet eivät olleet kriittisen korkeita, kun huomioidaan, että rakenteen kosteusrasitus oli melko suuri johtuen korkeasta sisäpuolisesta RH:sta ja höyrünsulkukalvon puutteesta.

Kenttäkokeen tueksi tehtiin rakennusfysikaalista laskentaa MATCH-laskentaohjelmalla. Laskennassa rakenteen sisäpuolen vesihöyrynvastus asetettiin tarkoituksella normaalia alemmas, jotta tuloksiin tulisi varmuutta. Laskentatulosten perusteella kondensoitumista saattaa tapahtua riippuen käytetystä aluskatemateriaalista.

Laboratoriotesteissä tutkittiin aluskatteiden tärkeimpiä materiaaliominaisuuksia, joita olivat vesihöyrynläpäisevyys, sadevedenpitävyys ja niin sanottu telттаefekti. Vesihöyrynläpäisevyys testattiin märkäkuppikoemenetelmällä standardin ASTM E-96 mukaisesti. Testejä tehtiin yhteensä 25 eri aluskatetuotteelle, jossa oli mukana sekä tiiviitä perinteisiä aluskatteita että uusia diffuusioavoimia aluskatetuotteita. Diffuusioavoimien aluskatteiden vesihöyrynläpäisevyyden s_d -arvo oli alle 0,55 m, kun perinteisten tiiviiden aluskatteiden s_d -arvot olivat välillä 5,5 – 92 m.

Sadevedenpitävyyttä tutkittiin lähinnä sen takia, että saatiin tietoa aluskatteiden käytettävyydestä työnaikaisena suojauksena. Sadevedenpitävyyttä tutkittiin eri kattokaltevuuksilla ja tuulennopeuksilla ja suunnilla. Tutkimuksessa todettiin, että yleisesti enemmän sadevettä pääsi sisään niissä rakenteissa, joissa aluskate oli asennettu kattokannattajia vastaan kohtisuorasti verrattuna siihen, että aluskate olisi asennettu kattokannattajien suuntaisesti.

Telттаefektiä tutkittiin sitä varten kehitetyllä testimenetelmällä (NT Build 488 "Roof tile underlays: watertightness – Tent Effect"). Tutkimuksessa todettiin joidenkin aluskatteiden päästävän huomattavasti vettä sisään telттаefektin vaikutuksesta.

Kenttätutkimuksia todellisissa rakennuskohteissa tehtiin talvina 1995 ja 1996. Tutkimuksissa todettiin joidenkin aluskatteiden päästävän vettä sisään. Tämän arveltiin johtuvan juuri aluskatteen telттаefektistä. Tutkimuksen löydösten seurauksena useita aluskatetuotteita vedettiin Tanskassa markkinoilta. Nykyisin ne tuotteet, jotka eivät läpäise telттаefektin tutkimusmenetelmää, on vedetty Tanskassa markkinoilta tai niitä on siltä osin paranneltu. Kenttätutkimuksissa todettiin joissakin aluskatteissa kasvavan homeita ja noin joka toisessa muodostui jäätä aluskatteen alapintaan talven aikana. Silmämääräisesti arvioituna näiden arveltiin johtuvan epätiiviestä höyrünsulusta. Lisäksi tutkimuksessa kiinnitettiin huomiota katon yksityiskohtien huonoon toteutukseen, jonka arveltiin johtuvan useista syistä. Joissakin tapauksissa aluskatetoimittajilla ei ole ohjeita yksityiskohtien toteutukseen, tai jos ohjeet ovat olemassa, niin ne ovat puutteelliset.

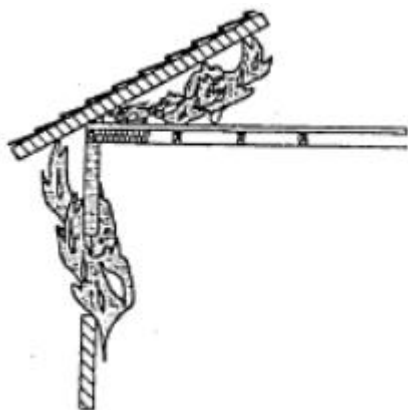
Suurimmaksi syyksi yksityiskohtien huonoon toteutukseen todettiin kuitenkin, että niitä ei työmaalla viitsitä tai ehditä tehdä kunnolla, koska niiden huolellinen toteuttaminen on työlästä.

Tutkimusten johtopäätöksinä listattiin tärkeimmät asiat, joiden tulee toteutua, jotta tuulensuoja-aluskaterakenne toimisi hyvin.

- Aluskatteen tulee olla sadevedenpitävä. Tämän tulee päteä myös kaatosateen aikana, kun vettä tulee tiilien alle.
- Aluskatteella ei saa olla niin sanottua teltaefektiä.
- Aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden tulee olla suuri. Tanskassa vesihöyrynläpäisevyyden tulee olla vähintään $3 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, joka vastaa s_d -arvoa 0,55 m.
- Katon sisäpuolen tulee olla riittävän ilma- ja vesihöyrytiivis.
- Kattorakenteen kaikkien yksityiskohtien toteuttamiseen tarvittavat suunnitelmat tulee olla saatavilla.

5.6 Norja

Norjassa rakenne on ollut tunnettu jo ainakin 1990-luvulla. Siellä diffuusioavointa aluskatetta voidaan käyttää sekä vinossa katossa että ullakkotilallisessa katossa. Tuulensuoja-aluskaterakenteen etuna on pidetty Norjassa erityisesti sitä, että se estää tuiskuvan lumen pääsyn katon sisään, ja että rakenne toimii tulipalossa perinteistä kattoa paremmin rajoittaen tulipalon leviämistä ullakkotilaan tuuletusrakojen kautta [27]. Kuvassa (Kuva 23) on esitetty mahdollinen tilanne, jolloin tuli leviää ullakkotilaan tuuletusrakojen kautta.



Kuva 23: Tulen leviäminen ullakkotilaan tuuletusrakojen kautta [48].

Kun tuuletusrakoja ei ole, niin tulipalo ei leviä niin herkästi ullakkotilaan.

Tuulensuoja-aluskaterakenteen käytöllä on lähteen [49] mukaan useita etuja:

- Rakenne vähentää tulenleviämisen vaaraa ullakolle
- Rakenne antaa hyvän suojan sisään puhaltavaa lunta vastaan

- Rakenne vähentää kylmän ilman vaikutusta lämmöneristykseen
- Aluskatteen hyvä ja tiivis asennus parantaa katon ilmatiiviyttä

Haittana lähde [49] mainitsee, että rakenteella on jonkin verran huonompi kuivumiskyky ulospäin kuin perinteisellä tuuletetulla ullakolla, erityisesti silloin, kun ulkoilman lämpötila on pakkasen puolella.

Rakenne on esitetty laajassa norjalaisessa rakennetietojärjestelmässä (Byggforskserien). Rakennetietojärjestelmä sisältää rakennedetaljikortiston, joka on samantapainen kuin Suomen RT-kortisto. Siinä eri rakenteista esitellään yksityiskohtaiset tiedot, suositellut käyttökohteet, materiaalivaatimukset sekä muut rakennetiedot kuvien kanssa. Tuulensuoja-aluskaterakenteelle löytyy järjestelmästä oma rakennetietokorttinsa vinolle katolle [23], ullakkotilalliselle katolle [49] ja katolle, jossa ullakko on osin asuinkäytössä (Byggdetaljer 525.107). Lisäksi järjestelmästä löytyy erikseen rakennetietokortti aluskatteelle, missä esitetään suosituksia aluskatteen käytölle ja sen materiaaliominaisuuksille (Byggdetaljer 525.866). Tuulensuoja-aluskaterakenteen käytölle annetaan Norjassa muun muassa seuraavia suosituksia [23]:

- Kattokaltevuuuden tulee olla vähintään 1:3.
- Aluskatteen ja vesikatteen välisen tuuletusvälin korkeus riippuu katon kaltevuudesta ja kattolapteen pituudesta taulukon (Taulukko 10) mukaisesti.
- Katolle tulee tehdä tuuletusraot ainakin räystäälle ja harjalle.
- Aluskatteen tulee olla vedenpitävä ja samalla vesihöyryavoin ($s_d \leq 0,5\text{m}$).

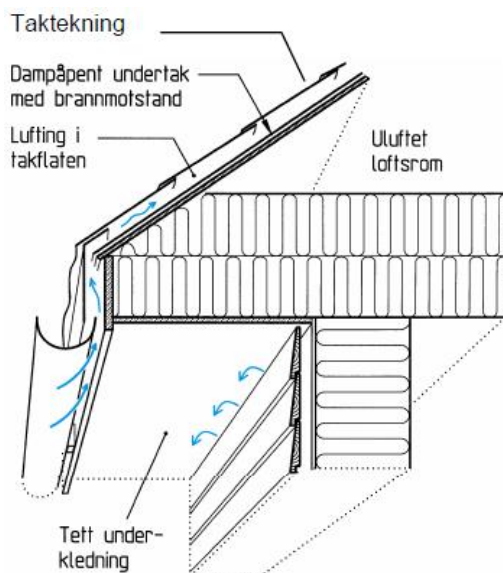
Taulukko 10: Suositus aluskatteen ja vesikatteen välisen tuuletusvälin korkeudeksi kattokaltevuuuden ja kattolapteen pituuden mukaan.

Kattokaltevuus	Kattolapteen pituus (m)			
	5	7,5	10	15
18°-20° (~1:3)	36	53	72	100
21°-25° (~1:2,5)	30	46	60	90
26°-30° (~1:2)	23	36	46	72
31°-35° (~1:1,5)	23	30	36	60
36°-40° (~1:1,3)	23	30	36	53
≥41°	23	23	36	46

Norjassa markkinoilla on useita eri valmistajan diffuusioavoimia aluskatetuotteita. Useilla tuotteilla on Sintefin myöntämä sertifikaatti (Sintef certification).

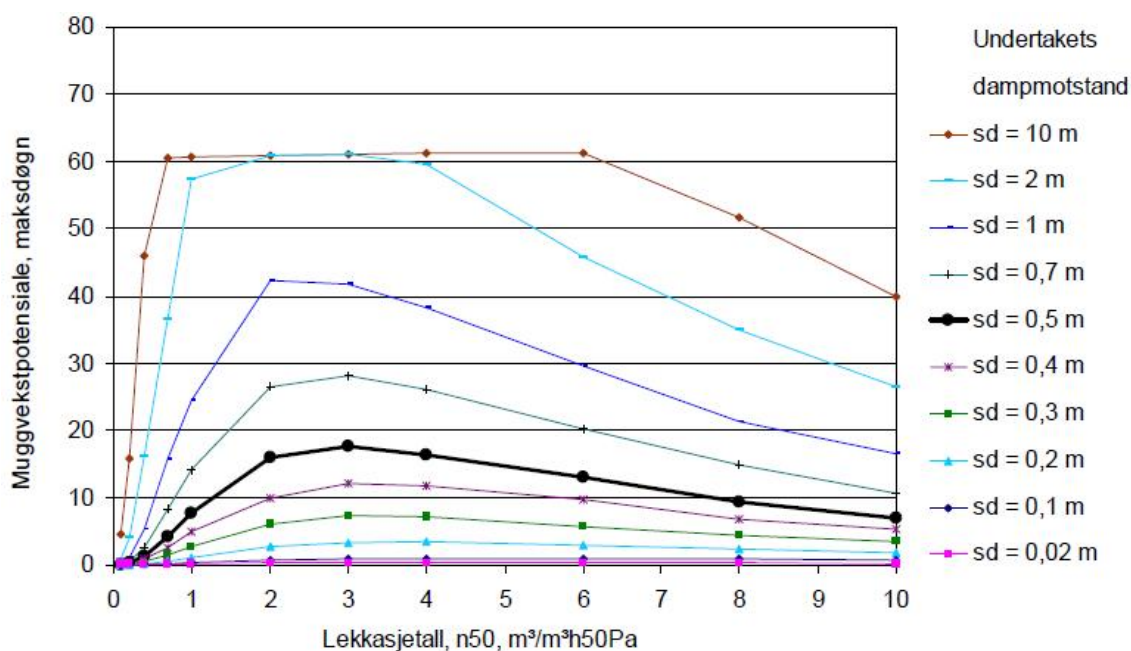
Byggforsksin tekemässä teoreettisessa tutkimuksessa [27], joka oli osa laajempaa projektia (Klima 2000), tutkittiin kylmän ullakkorakenteen kosteus- ja lämpötila-

olosuhteita sekä näihin liittyen homeen kasvun riskiä ullakkorakenteessa. Tutkimuksen kohteena oli perinteinen yläpohja, jossa oli tuuletettu ullakkotila sekä tuulensuoja-aluskaterakenne, jossa ullakkotila oli suljettu tuulettumattomaksi aluskatteella. Tutkimuksessa kuvattiin tuulensuoja-aluskaterakenne uudenaikaisena rakenteena, jolla on hyväksyttävä varmuus palon leviämistä vastaan ullakolle. Palosuojauksena rakenteeseen suositeltiin asennettavaksi aluskatteen alle joko jäykkä lämmöneristys tai raakaponttilaudoitus. Tutkittu rakenne on esitetty kuvassa (Kuva 24).



Kuva 24: Tutkimuksessa tutkittu tuulensuoja-aluskaterakenne. Aluskatteen alle suositellaan palonsuojaukseksi joko jäykkää lämmöneristemateriaalia tai raakaponttilaudoitusta. [27]

Tutkimuksessa rakenteen toimivuutta arvioitiin homeenkasvun riskin perusteella. Sitä arvioitiin vallitsevien lämpötila- ja kosteusolosuhteiden perusteella. Tutkimuksessa homekasvun riskiä laskettiin useilla eri muuttujilla ja eräänä tuloksena saatiin aluskatteen vesihöyrynläpäisevyydelle suositusarvo. Rakennusfysikaalisen laskennan erilaisia muuttujia olivat sisäilman kosteus ja lämpötila, rakennuksen ilmanvaihto ja vuotoilmaluku, aluskatteen vesihöyrynläpäisevyys sekä rakennuksen sijainti. Kuvassa (Kuva 25) on esitetty esimerkki yhdestä tutkimuksen laskennan perusteella saaduista kuvaajista. Siinä on esitetty miten homeenkasvun riskiin vaikuttaa aluskatteen s_d -arvo sekä rakennuksen ilmapuotoluku.



Oslo, 2 etg., samlet golvareal: 150 m², fuktproduksjon: 10 kg/d, grunnventilasjon: 0,2 m³/(m³·h)

Kuva 25: Tutkimuksessa tehdyn rakennusfysikaalisen laskennan perusteella piirretty kuvaaja esittää miten homeenkasvun riskiin vaikuttaa aluskatteen s_d -arvo sekä rakennuksen ilmavuotoluku. Tässä laskentatapauksessa rakennus sijaitsi Osllossa, kosteus-tuotto sisätiloissa oli 10 kg/d ja ilmanvaihto oli 0,2 m³/(m³·h).[27]

Kuvasta on huomattava, että jos aluskatemateriaalin vesihöyrynläpäisevyys on suuri ($s_d = 0,02$ m), niin homeenkasvun riski on huomattavasti alhaisempi verrattuna vesihöyrynläpäisevyydeltään tiiviimpiin alusrakenteisiin. Lisäksi on mainittava, että tutkimuksen kaikissa eri laskentatapauksista piirretyistä kuvaajissa käyrien järjestys oli kuvan mukainen. Eli kaikissa tapauksissa alhaisin homekasvun riski oli aluskatemateriaalilla, jonka vesihöyrynläpäisevyys oli suurin.

Tutkimuksen johtopäätöksissä todetaan tutkimuksen tuottaneen hyvää perustietoa homeenkasvun riskeistä ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Homeenkasvun riskiä voidaan tutkimuksen mukaan pienentää valitsemalla aluskatteeksi hyvin vesihöyryä läpäisevä aluskate. Tutkimuksen perusteella annettiin katon alusrakenteen s_d -arvolle suositusarvo. Tässä aluskattoon laskettiin mukaan laudoitus ja aluskate. Kun s_d -arvo on enintään 0,5 m, niin homeenkasvu on tutkimuksen mukaan hyväksyttävissä rajoissa. Tutkimuksessa kuitenkin todettiin myös, että laskennan avulla ei voi määrittää tarkasti sitä, mikä homeenkasvu on sallittua ja mikä ei.

5.7 Ruotsi

Tuulensuoja-aluskaterakenne on Ruotsissa nykyään vielä melko epätavallinen rakenne, kun verrataan tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttöä Norjassa ja Tanskassa [24]. Ruotsissa yleisin tapa rakentaa puurakenteinen, jyrkkä ja vino katto on tehdä katto edelleen tuuletettuna ja raakaponttilaudoituksella varustettuna [25]. Kuitenkin myös tuulensuoja-aluskaterakenne on mahdollinen sen täyttäessä kaikki Ruotsin rakennusmääräysten vaa-

timukset, mistä osoituksena on erään diffuusioavoimen aluskatetuotteen saama ruotsalainen sertifikaatti kyseiselle rakenteelle [P-märkning för Tyvek]. Vapaasti asennettavan aluskatteen vesihöyrynvastuksen tulee Ruotsissa olla s_d -arvoltaan enintään 0,2 m [50]. Tuulensuoja-aluskaterakennetta käytettäessä tulee kattokaltevuuuden olla vähintään 14° (1:4) [51], [52].

Diffuusioavoimia aluskatteita on Ruotsissa saatavilla useita eri valmistajien tuotteita, joista ainakin yhdellä on Ruotsin teknisen tutkimuslaitoksen (SP:n) vahvistama sertifikaatti (P-märkning). Sertifikaatti takaa sen, että tuote täyttää valmistajan lupaamat materiaaliominaisuudet sekä sen, että tuotteen käyttö valmistajan sille ilmoittamassa rakenteessa täyttää Ruotsin rakentamismääräykset.

Tuulensuoja-aluskaterakennetta on tutkittu Ruotsissa usean eri laitoksen toimesta. Tutkimukset ovat olleet kenttätutkimuksia, laboratoriotutkimuksia sekä rakennusfysikaalista laskentaa. Seuraavassa on esitelty Ruotsissa tehtyjä tutkimuksia.

5.7.1 Kenttätutkimus, Porsgrunn Norja, 2000 ja 2006

Ruotsin tekninen tutkimuslaitos (SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut) teki kenttätutkimuksen, jossa tutkittiin tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttäytymistä todellisessa rakennuskohteessa. Tutkimus tehtiin Norjan Porsgrunnissa, joka sijaitsee reilu 100 km Oslostalounaaseen, vuosina 2000 ja 2006 [53]. Tavoitteena oli selvittää miten tuulensuoja-aluskaterakenne toimii käytännössä. Tutkimuksessa tutkittiin kahden omakotitalon kattorakenteiden kuntoa tekemällä rakenneavauksia sekä mittaamalla niistä kosteuspitoisuuksia kahtena eri vuonna (2000 ja 2006). Ensimmäiset mittaukset suoritettiin, kun talot olivat verrattain uusia vuonna 2000 ja seuraavat mittaukset tehtiin kuusi vuotta myöhemmin vuonna 2006. Talojen sisäpuoliset höyrinsulut eivät olleet täysin tiiviitä ja niissä oli osittain merkittäviä epätiiviyiskohtia. Esimerkki epätiiviyistä kohdasta on esitetty kuvassa (Kuva 26). Lisäksi molempien talojen yläkerrat todettiin ylipaineiseksi.



Kuva 26: Alakatto on purettu ja höyrynsulku on näkyvissä. Läpiviintiä ei ole tehty tiiviisti höyrynsulkumuoviin. [53]

Kosteusmittausten ja rakenneavausten perusteella selvisi, että huolimatta epätiiveydestä ja suuresta sisäpuolisesta kosteuslisästä ei kattorakenteissa havaittu merkkejä kosteusvaurioista. Tutkimuksen johtopäätöksissä todettiin, että katto oli selvinnyt kosteusrasituksesta kiittävästi johtuen diffuusioavoimesta aluskatteesta, joka sallii kattorakenteen kuivumisen ulos [53].

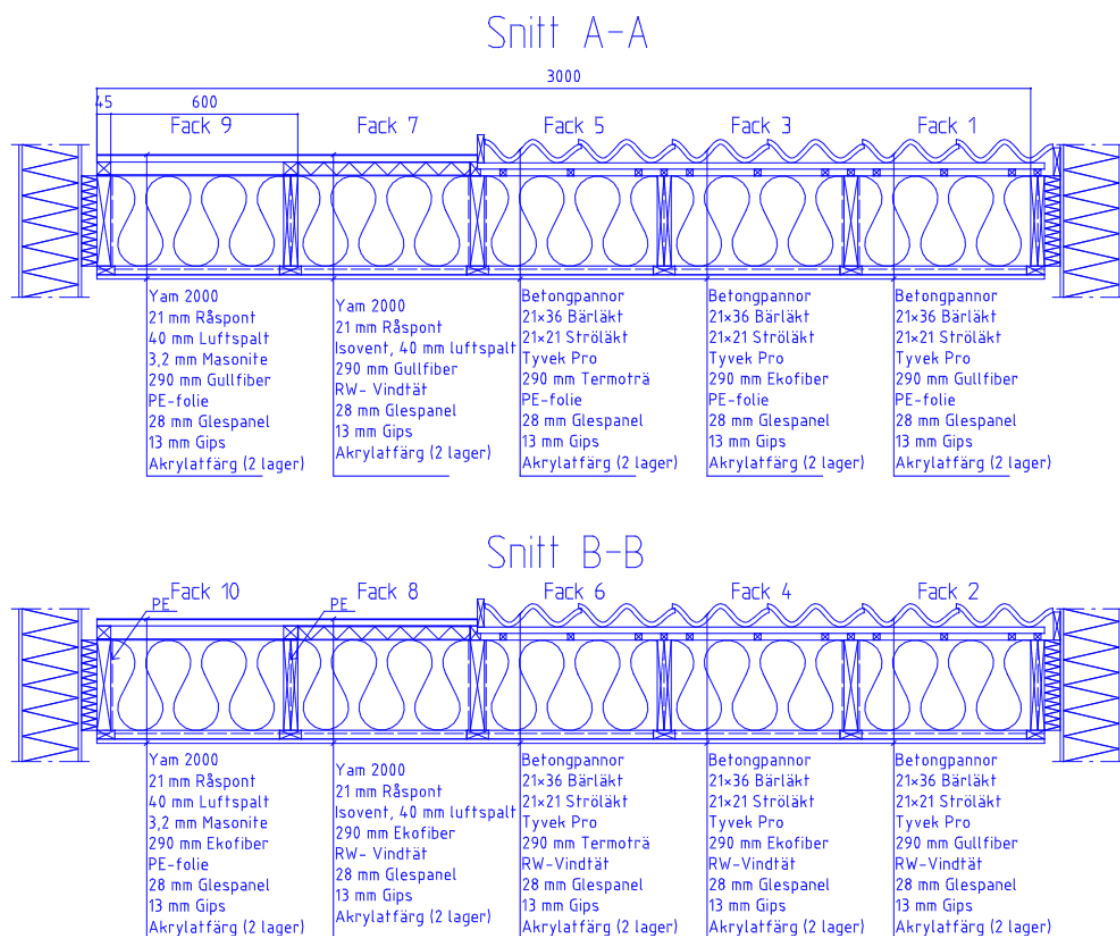
5.7.2 Laboratoriotutkimus, 2000

Ruotsin tekninen tutkimuslaitos (SP) tutki tuulensuoja-aluskaterakennetta laboratoriotutkimuksessa vuonna 2000. Tutkimuksen tavoitteena oli vertailla kolmea eri asiaa ja tutkia niiden vaikutusta rakenteen kosteustekniseen käyttäytymiseen.

- Lämmöneristeen vaikutus, jota tutkittiin kolmella eri lämmöneristeellä: kaksi erilaista puhallettavaa selluloosakuitua (Termoträ ja Ekofiber) tai mineraalivilla
- Lämmöneristeen ulkopinnan tuulensuojan vaikutus, jota tutkittiin asentamalla lämmöneristeen pintaan kovalevy (Masonite), tuuletusvälin muodostava aaltopahvi (Isovent) tai vesihöyryvoin aluskate (Tyvek)
- Sisäpuolen ilmansulun vesihöyrytiivyyden vaikutus, jota tutkittiin kahdella eri ilmansulkumateriaalilla: tiivis höyrynsulku (PE-kalvo) ja vesihöyryä läpäisevä ilmansulku (tuulensuojakalvo)

Tutkimuksessa verrattiin perinteisen tuuletetun kattorakenteen ja tuulensuoja-aluskaterakenteen kosteusteknistä toimintaa altistamalla kattorakenne sisäilman diffuusiolle, ulkopuoliselle kondenssille, pienille vesivuodoille ja sisäilman konvektiovirtaukselle.

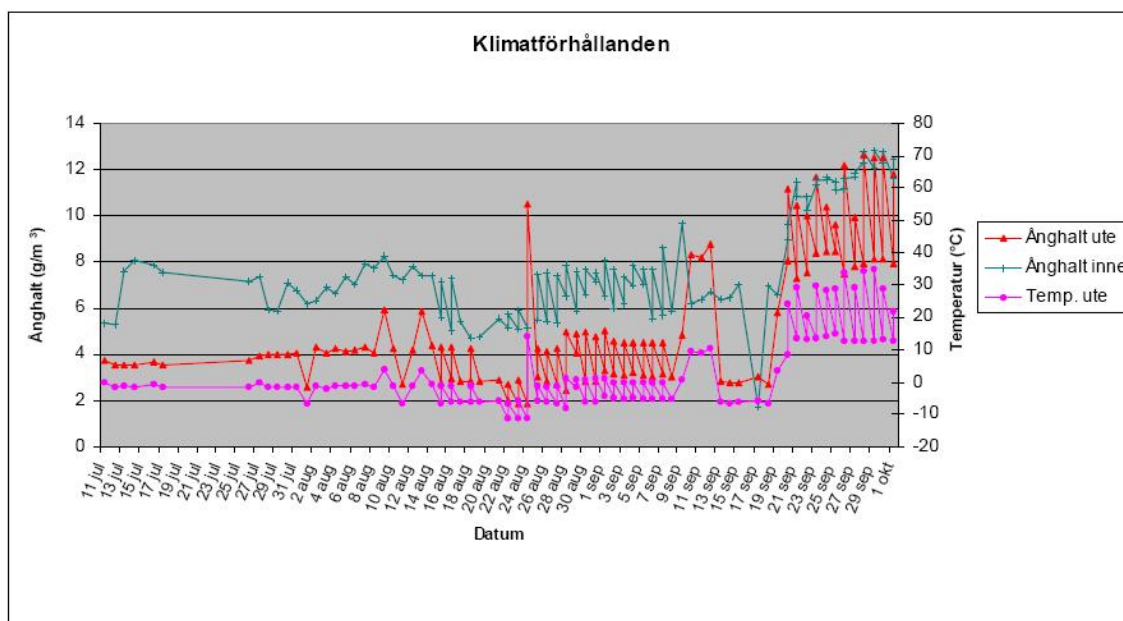
Tutkimuksessa säähuoneeseen rakennettiin 10 testirakennetta. Testirakenteiden leikkauskuvat on esitetty kuvassa (Kuva 27).



Kuva 27: Laboriatoritutkimuksen kymmenen testirakennetta. Rakenteisiin, joissa on aluskatteen alapuolella tuuletusväli, ei asennettu tiilikatetta. Koerakenteissa käytetyt tuotteet vastaavat karkeasti seuraavia: YAM 2000 = bituminen aluskermi; 3,2 mm Masonite = kovalevy; Isovent = tuuletusvälin muodostava aaltopahvilevy; RW vindtät = tuulensuojakalvo (vesihöyryä läpäisevä). [24]

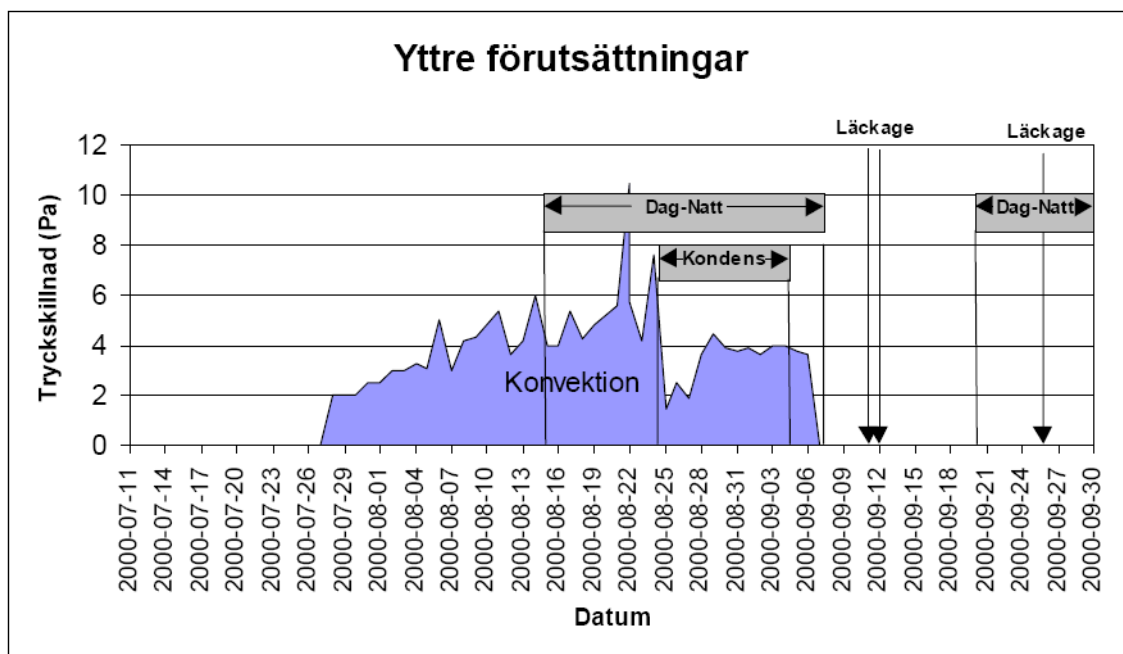
Kahdessa testirakenteessa (rakenteet 9 ja 10) oli tuulensuojana kovalevy (Masonite), kahdessa (rakenteet 7 ja 8) oli lämmöneristeen päällä tuuletusvälin muodostava aaltopahvilevy (Isovent) ja kuudessa (rakenteet 1-6) oli tuulensuojana diffuusioavoin aluskate (Tyvek Pro). Rakenteet 1-6 kuvasivat tuulensuoja-aluskaterakennetta ja rakenteet 7-10 kuvasivat perinteistä tuuletettua rakennetta. [54]

Testirakenteen sisäpuolella oli kostean sisäilman olosuhteet ja ulkopuolella oli syksy/talvi-ilmasto. Kuvassa (Kuva 28) on esitetty lämpötila- ja kosteusolosuhteet kokeen ajalta. Rakenteet olivat säähuoneessa 3 kuukautta.



Kuva 28: Lämpötilaolosuhteet ja vesihöyrypitoisuudet kokeen ajalta. [54]

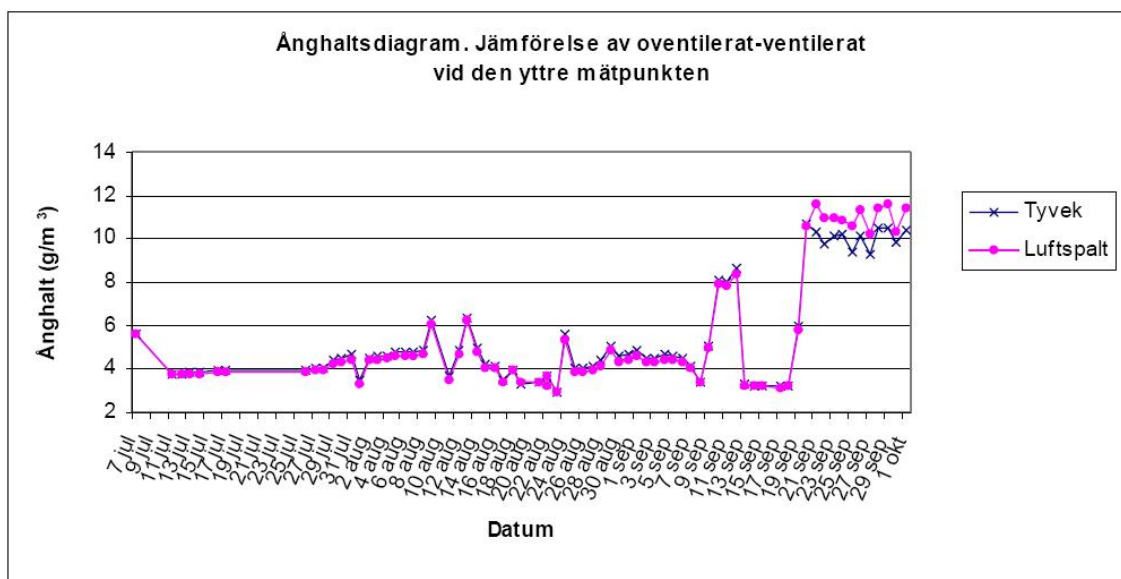
Kosteuden diffuusiota tarkasteltiin asentamalla rakenteen sisäpuolelle joko tiivis PE-kalvo tai melko vesihöyryavoin tuulensuojakalvo. Sisäilman konvektiota tarkasteltiin tekemällä rakenteen sisäpuolen ilmansulkuun ja ulkopuolen tuulensuojaan noin 10 mm reikä ja luomalla rakenteen sisäpuolelle ylipaine. Vesivuoto mallinnettiin laittamalla rakenteen sisään puukapula, jonka ympärille oli kääritty kostea paperi. Paperiin oli imeytetty vettä noin 100g. Vesivuoto mallinnettiin tällä tavoin kahdesti. Ulkopuolinen kondenssi kuvasi katon jäähtymistä selkeinä ja kylminä öinä, jolloin rakenteen ulkoilman kosteus saattaa kondensoitua vesikatteen alapintaan tai jopa aluskatteen päälle. Ulkopuolista kondenssia mallinnettiin suihkuttamalla aluskatteen pintaa vettä. Kuvassa (Kuva 29) on esitetty rakenteen kosteusrasitusta kuvaavat vaiheet kokeen aikana.



Kuva 29: Rakenteen kosteusrasitusta kuvaavat vaiheet kokeen ajalta. [54]

Kosteuspitoisuutta ja lämpötilaa mitattiin rakenteesta kolmesta pisteestä: läheltä lämmöneristeen ulkopintaa, keskeltä ja läheltä lämmöneristeen sisäpintaa.

Vertailtaessa perinteisen tuuletetun ja tuulensuoja-aluskaterakenteen kosteusteknistä toimintaa tutkimuksessa todettiin, että erot rakenteiden välille muodostuivat kokeen loppupuolella, jolloin lämpötila oli korkea. Kuvassa (Kuva 30) on vertailtu perinteisen tuuletetun ja tuulensuoja-aluskaterakenteen kosteuspitoisuuksia. Mittauspiste sijaitsee lähellä lämmöneristeen ulkopintaa. Kokeen loppuvaiheessa oleva korkeampi lämpötila kuvaa lämmintä vuodenaikaa, jolloin rakenne pääsee kuivumaan.

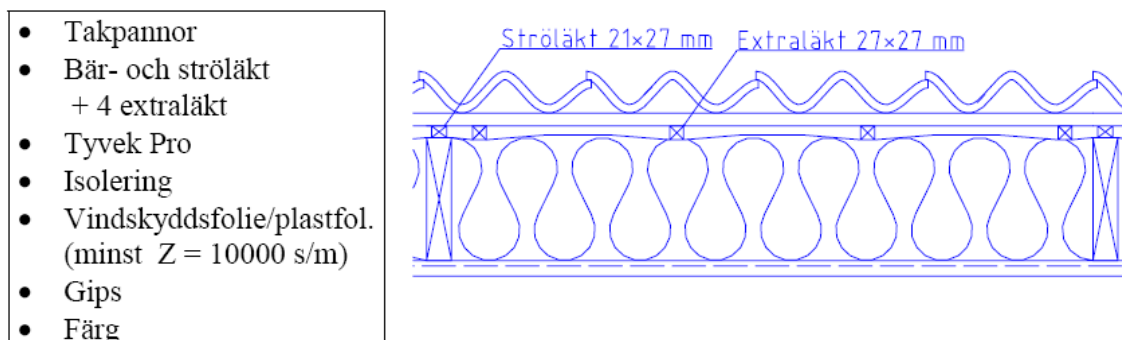


Kuva 30: Kosteuspitoisuuksien vertailua perinteisessä tuuletetussa rakenteessa ja tuulensuoja-aluskaterakenteessa. [54]

Kuvasta nähdään, että tuulensuoja-aluskaterakenteessa kosteuspitoisuus oli kokeen loppuvaiheessa alhaisempi kuin perinteisessä tuuletusvälillisessä rakenteessa. Erot kosteuspitoisuuksissa rakenteiden välillä johtuvat pääasiassa rakenteiden 9 ja 10 korkeammista kosteuspitoisuuksista. Näissä rakenteissa tuulensuojana oli kovalevy ja näiden rakenteiden kosteuspitoisuudet olivat kokeen loppuvaiheessa korkeammat kuin rakenteiden, joissa oli tuuletusvälin muodostava aaltopahvilevy (rakenteet 7 ja 8) sekä tuulensuoja-aluskaterakenteiden (rakenteet 1-6). Rakenteiden, joissa oli tuuletusvälin muodostava aaltopahvilevy ja tuulensuoja-aluskaterakenteiden välillä ei ollut selkeitä eroja kosteuspitoisuuksissa. [54]

Tutkimuksen mukaan tuulensuoja-aluskaterakenteeseen ei kertynyt kosteutta kokeen aikana eikä aluskate muodostanut estettä rakenteen kuivumiselle [24].

Tutkimuksen yhteenvedossa esitetään tutkimuksen tuloksena kosteusteknisesti hyvin toimiva rakenne (Kuva 31). Tutkimuksessa havaittiin myös, että käytettäessä puhallettavia lämmöneristeitä tulee aluskatteen päälle asettaa 4 kappaletta ylimääräisiä rimoja. Tällä saadaan aikaan riittävä tuuletusväli, jolloin aluskate ei pullistuessaan tuki ilmaväliä. Lisäksi tutkimuksessa huomattiin, että aluskatteesta saadaan yleisesti tiiviimpi, kun aluskate asennetaan kattokannattajien suuntaisesti.



Kuva 31: Tutkimuksen tuloksena esitetty kosteusteknisesti hyvin toimiva rakenne. [55]

Kommentit

Tutkimuksessa perinteistä rakennetta kuvataan neljällä eri rakenteella (rakenteet 7-10). Kahdessa rakenteessa lämmöneristeen päällä on tuulensuojana kova puukuitulevy, Masonite (rakenteet 9 ja 10) ja kahdessa rakenteessa lämmöneristeen päällä on tuuletusvälin muodostava aaltopahvilevy (rakenteet 7 ja 8). Kovan puukuitulevyn vesihöyrynläpäisevyys ($s_d \approx 0,28$ m) on jonkin verran suurempi kuin diffuusioavoimen aluskatteen ($s_d \approx 0,02$ m), joten nämä rakenteet (9 ja 10) eivät kuvaa parhaiten aluskatteen alapuolelta tuuletettua rakennetta, koska kovalevy toimii tuulensuojana kuten aluskatekin. Kuvassa (Kuva 30) on esitetty tuulensuoja-aluskatteen ja perinteisen aluskatteen alapuolelta tuuletetun rakenteen kosteuspitoisuudet. Kuvassa perinteisen rakenteen kosteuspitoisuuden käyrällä on nimi ”Luftspalt”, joka tarkoittaa tuuletustilaa. Tämä käyrä kuvaa rakenteiden 7-10 kosteuspitoisuuksia. Jotta voitaisiin verrata tuulensuoja-rakenteen ja aluskatteen alapuolelta tuuletetun rakenteen kosteuspitoisuuksia, pitäisi vertailuun ottaa mukaan vain tuulensuoja-aluskaterakenteet (rakenteet 1-6) ja rakenteet, joissa lämmöneristeen päällä on tuuletusvälin muodostava aaltopahvilevy (rakenteet 7 ja 8).

Tutkimuksen raportissa kerrotaan erikseen, että jos verrataan keskenään vain rakenteita 1-6 ja rakenteita 7 ja 8, niin kosteuspitoisuuksissa näiden välillä ei ollut merkittävää eroa tutkimuksen missään vaiheessa. Tällöin myös rakenteiden kuivumiskyky olisi yhtä hyvä ja siten Kuva 30 antaa hieman väärän kuvan rakenteen kosteusteknisestä toiminnasta.

Tutkimuksen oleellisin tieto tulee kuitenkin hyvin esille kuvasta (Kuva 30). Koska kosteuspitoisuuksissa ei ollut tutkimuksen aikana eroa perinteisen ja tuulensuoja-aluskaterakenteen välillä, niin tuulensuoja-aluskate pystyy kuivumaan yhtä hyvin perinteinen rakenne.

5.7.3 Kenttätutkimus, Tukholma, 2004–2006

Lundin teknisen korkeakoulun tekemässä kenttätutkimuksessa mitattiin kylmän ullakotilan kosteutta ja lämpötilaa, kun ullakotilan tuulettumista oli rajoitettu ja kattorakenteena oli raakaponttilaudoituksen päälle asetettu diffuusioavoin aluskate.

Mittaukset tehtiin neljässä nelikerroksisen kerrostalon ullakkotiloissa Gubbängensissä Tukholman alueella (Kuva 32). Rakennukset olivat valmistuneet vuonna 2004 ja mittaukset aloitettiin saman vuoden syyskuussa. Lämpötilaa ja kosteutta mitattiin ullakkotilasta, kattotuoleista, raakaponttilaudoituksesta sekä ulkoilmasta kahden vuoden ajan.



Kuva 32: Tutkimuksen kohteena ollut kerrostalo Gubbängensissä [55]

Kattorakenne oli seuraavanlainen: Tiilikate, vaakarima 25x38, korotusrima 25x25 k600, diffuusioavoin aluskate ja raakaponttilaudoitus kattotuolien päällä. Rakennuksen yläpohja oli betonirakenteinen. Tutkimuksessa ei mitattu rakennuksen sisäilman olosuhteita. Ullakkotilan tuulettumista oli rajoitettu selvästi sulkemalla tuuletusraot räystäällä ja päädyissä (Kuva 33).

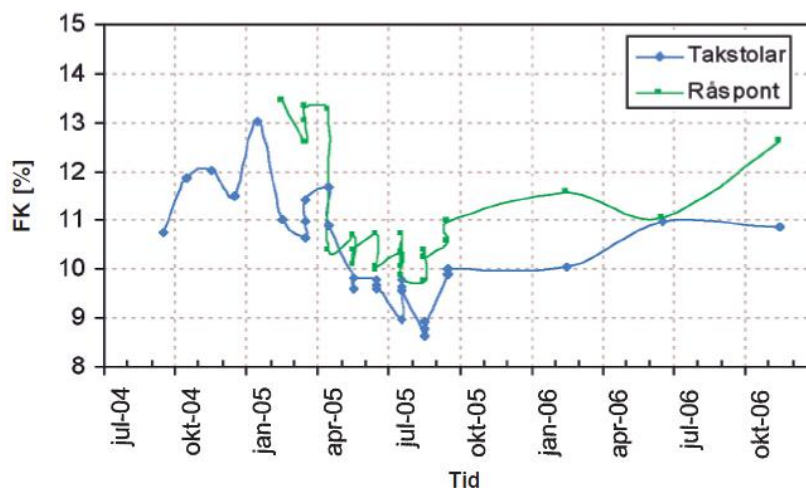


Kuva 33: Ullakkotilan tuulettumista rajoitettiin voimakkaasti sulkemalla tuuletusraot räystäällä ja rakennuksen päädyissä. [55]

Mittaustulosten mukaan ullakkotilan lämpötila oli koko ajan hieman ulkoilmaa lämpimämpi. Ullakkotilan ilman vesihöyrynpitoisuus oli ulkoilmaa suurempi suurimman osan vuotta, jolloin ullakkotilan ilmassa oli kosteuslisää verrattuna ulkoilman kosteuspiitoisuuteen. Kosteuslisä oli ullakkotilassa suurimmillaan keväällä ($0,5 - 0,75 \text{ g/m}^3$) ja pienimmillään syksyllä ($-0,16 \text{ g/m}^3$), jolloin kosteuslisä oli negatiivista. Ullakkotilan ilman vesihöyrynpitoisuus syksyllä oli siis ulkoilmaa pienempi. Vaikka ullakkotilan ilmassa oli suurimman osan vuotta enemmän kosteutta kuin ulkoilmassa, niin suhteellinen kosteus ullakkotilan ilmassa oli kuitenkin pienempi kuin ulkoilmassa koko mittausajan. Tämä johtui ullakkotilan hieman korkeammasta lämpötilasta. Kosteuslisän negatiivisten arvojen arveltiin tutkimuksessa johtuvan joko mittausajan epätarkkuudesta

tai siitä, että ullakkotilan ilma kuivuu kylminä ja kirkkaina öinä, kun kosteus siirtyy aluskatteen ja raakapontin läpi tiilikatteen alapintaan, johon muodostui kondenssi.

Mittaustulokset kattotuolien ja raakaponttilaudoituksen kosteuspitoisuudesta näyttivät alhaisia arvoja. Kosteuspitoisuudet eivät nousseet mittausten missään vaiheessa kriittiselle tasolle. Seuraavassa kuvassa (Kuva 34) on esitetty kosteuspitoisuuden tulokset kattotuoleista ja raakaponttilaudoituksesta.



Kuva 34: Kosteuspitoisuus (%) kattotuoleissa (sininen käyrä) ja raakaponttilaudoituksessa (vihreä käyrä) ei noussut tutkimuksen missään vaiheessa kriittiselle tasolle [55]

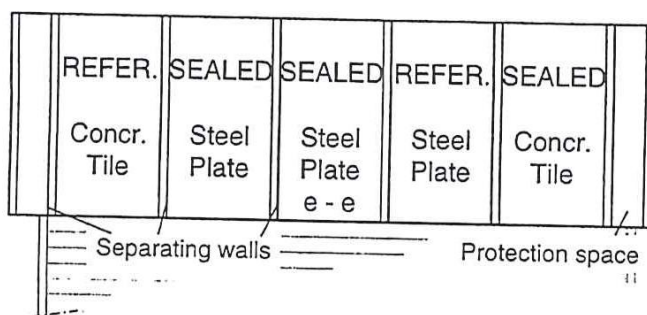
Tutkimuksen johtopäätöksenä todettiin, että ullakkotilan tuuletuksen rajoittaminen ja samalla diffuusioavoimen aluskatteen käyttäminen pienentää kosteus- ja mikrobivaurion riskiä verrattuna perinteiseen tuulettettuun kattoon, jossa on tiivis aluskatehuopa raakaponttilaudoituksen päällä.

5.8 Suomi

Diffuusioavoimia aluskatteita on tuotu Suomeen vuodesta 1989 lähtien [56]. Tällä hetkellä diffuusioavoimia aluskatteita on RT-tarviketieto.net -palvelun mukaan saatavilla usealta eri valmistajalta. Diffuusioavoimia aluskatteita on käytetty Suomessa enimmäkseen tavanomaisen tuuletetun rakenteen aluskatteen tapaan. Tuulensuoja-aluskaterakenne ei ole tällä hetkellä yleisesti käytössä, vaikka Suomesta löytyykin yksittäisiä kohteita, joissa sitä on käytetty. Tähän on vaikuttanut varmasti se, ettei rakenteelle löydy Suomesta yleisiä ohjeita. Rakennetta ei ole kuvattu esimerkiksi RT-korteissa tai RIL-julkaisuissa eikä myöskään rakennusteollisuuden omissa ohjeissa, kuten Kattoliiton julkaisemassa Toimivat katot -ohjeessa.

Tuulensuoja-aluskaterakennetta on tutkittu Suomessa VTT:n kenttäkokeessa vuosina 1998–2001. Kokeessa tutkittiin ullakkotilallisen yläpohjarakenteen kosteus- ja lämpöteknistä toimintaa, kun kosteusrasitus kattoon oli realistisella tasolla. Ullakkotila oli suljettu tuulettumattomaksi diffuusioavoimella aluskatteella ja tuuletusväli oli ainoastaan aluskatteen ja vesikatteen välissä. Kosteus- ja lämpöteknisten mittausten tuloksia verrattiin perinteisen tuuletetun ullakkotilallisen katon toimintaan. Rakenteita tutkittiin

VTT:n koetaloalueella Espoossa. Koetalon katto oli jaettu viiteen erilaiseen rakenteeseen, joista kaksi oli perinteisiä tuuletettuja rakenteita ja kolme oli tuulensuoja-aluskaterakenteita (Kuva 35). Vesikatteena käytettiin joko peltiä tai betonisia kattotiiliä. Katon tuuletus oli järjestetty perinteisillä katoilla sekä aluskatteen alta että päältä ja tuulensuoja-aluskaterakenteilla ainoastaan aluskatteen päältä. Yhdessä peltikatteellisessa katto-osassa oli tuuletusraot ainoastaan räystäällä, mutta muissa katto-osastoissa tuuletus oli järjestetty sekä räystäältä että harjalta (pienet reiät harjalla vastasivat tuulettuvuudeltaan katon tuulettamista rakennuksen päädyistä).



Kuva 35: Koetalon katon viisi erilaista kattorakennetta. Kesimmäisessä tuulensuoja-aluskaterakenteessa tuuletusraot ovat ainoastaan räystäällä (e-e). [21]

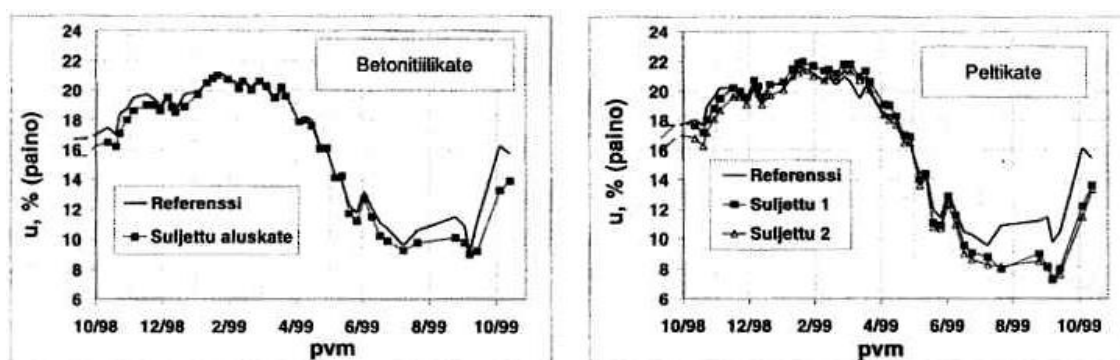
Katon kosteusrasitus järjestettiin joko ullakkotilassa olevilla avoimilla vesiastioilla tai johtamalla ullakkotilaan kosteaa sisäilmaa. Ilmavirtaus sisätiloista järjestettiin erityisten putkien läpi, jolloin ilmavirtauksen määrää pystyttiin mittaamaan. Katon höyrünsulku tehtiin ideaalisen tiiviisti, jolloin sisätiloista ei ollut ullakkotilaan hallitsemattomia ilmavuotoja. Ilmavirtauksella putkien kautta pyrittiin kuvaamaan mahdollisia ilmavuotoaukkoja ja mittaamaan ullakkotilaan vuotojen kautta tapahtuneen ilmavirran suuruus.

Ullakkorakenteen ja ulkoilman olosuhteita mitattiin koko kokeen ajan. Ulkoilmasta mitattiin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Ullakkotilasta mitattiin lämpötilaa, ilman kosteuspitoisuutta sekä suhteellista kosteutta. Päähuomio kiinnitettiin kuitenkin ullakkorakenteiden kosteuspitoisuuksiin. Kosteuspitoisuuksia mitattiin sekä kattotuoleista, että ohuista puulastuista.

Koe tehtiin kahdessa osassa vuosina 1998–2001. Ensimmäisessä osassa ullakkotilan kosteusrasitus oli kaikissa kattorakenteissa samansuuruinen ja se saatiin aikaan ullakkotilaan sijoitetuilla avoimilla vesiastioilla. Toisessa osassa ullakkotilan ja sisätilojen välille katon läpi sallittiin hallittu ilmavuoto. Ilma virtasi välipohjan läpi erityistä putkea pitkin, jolloin ullakkotilaan menevän ilman määrä voitiin mitata. Välipohjan ilmanpitävyys oli muualla katossa täydellinen. Ilma virtasi ullakkotilaan ainoastaan putkien kautta. Paine-ero ullakkotilan ja sisätilan välillä oli noin 20 Pa. Kokeen toinen osa jakaantui vielä edelleen kahteen vaiheeseen, joista ensimmäisessä ilmavuoto oli sisätiloista ullakkotilaan ja jälkimmäisessä ilmavuoto oli ullakkotilasta sisätilaan. Tutkimuksen eri vaiheet olivat seuraavat:

- Testijakso 1: Lokakuu 1998 – lokakuu 1999, samansuuruiset kosteuskuormat, jotka saatiin aikaan avoimilla vesiastioilla.
- Testijakso 2: Tammikuu 2000 – kesäkuu 2000, ilmavirtaus sisätiloista ullakkotilaan yläpohjan läpi, mikä saatiin aikaan sisätilojen noin 20 Pascalin ylipaineella.
- Testijakso 3: Lokakuu 2000 – toukokuu 2001, ilmavirtaus ullakkotilasta sisätiloihin yläpohjan läpi, mikä saatiin aikaan sisätilojen noin 20 Pascalin alipaineella.

Mittaustuloksia kokeen ensimmäiseltä osalta on esitetty kuvassa (Kuva 36). Siinä on esitetty kattotuoleista mitattujen kosteuspitoisuuksien maksimiarvoja (maksimiarvo neljästä mittauspisteestä), kun kattoon kohdistui lämmityskauden aikana jatkuva noin $1 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ suuruinen kosteusvirta.



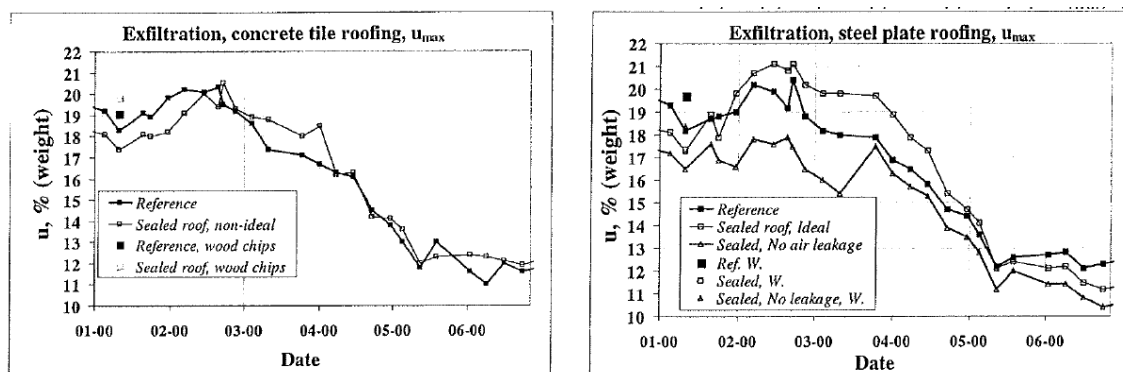
Kuva 36: Kattotuolien mitatut kosteuspitoisuudet (maksimiarvo neljästä mittauspisteestä) kokeen ensimmäiseltä osalta. Peltikaton tapauksessa tuuletusraot olivat ainoastaan räystäillä, kun muissa tapauksissa tuuletusraot olivat sekä räystäillä että harjalla [57]

Kuvasta nähdään, että kosteuspitoisuudet olivat hyvin samansuuruiset sekä tuulensuoja-aluskaterakenteella että perinteisellä tuulettulla rakenteella. Peltikaton tapauksessa mitatut kosteuspitoisuudet olivat talvella hieman suurempia (noin 1,5 %) verrattuna perinteiseen kattoon. Katon kuivumiskyky oli kuitenkin hyvä ja testijakson lopulla peltikaton mitatut kosteuspitoisuudet olivat jopa hieman alhaisempia (noin 2 %) kuin perinteisen katon.

Kokeen toisessa osassa tutkittiin rakennuksen sisäpuolelta tulevien ilmavuotojen vaikutusta ullakkotilan kosteus- ja lämpötekniseen käyttäytymiseen. Ullakkotilaan johdettiin rakennuksen sisältä hallitusti kosteaa sisäilmaa. Kattorakenteiden tuuletusperiaatteita muutettiin hieman tutkimuksen ensimmäisen osan tuuletusperiaatteista.

- Kaikissa katto-osissa tuuletusraot sijaitsivat ainoastaan räystäillä
- Yksi tuulensuoja-aluskaterakenteista oli ilmatiiviydeltään ideaalinen ja tähän rakenteeseen ilmavuoto sisätiloista oli estetty.
- Yksi tuulensuoja-aluskaterakenteista oli ilmatiiviydeltään epäideaalinen. Sen räystäässivuilla oli suuruudeltaan $1,5 \text{ mm} \times 1,2 \text{ m}$ raot. Tällä selvitettiin sitä, miten herkkä tuulensuoja-aluskaterakenne on rakentamisen aikaisille virheille.

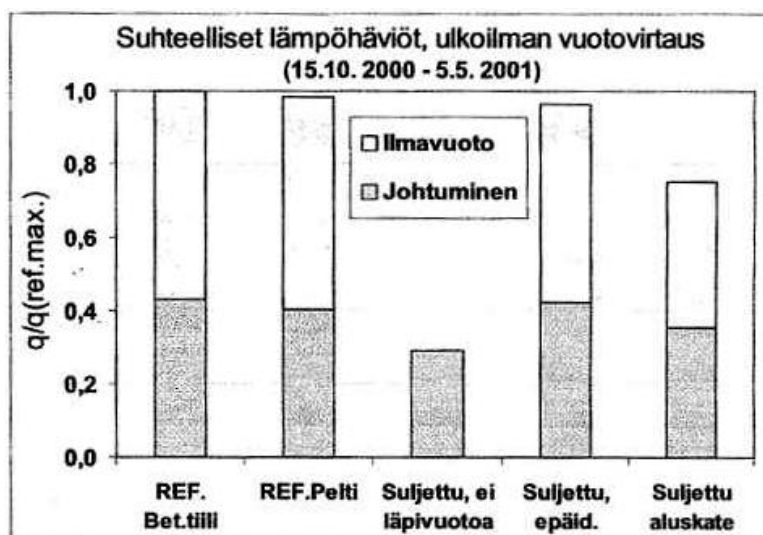
Paine-ero sisäpuolen ja ullakkotilan välillä oli 20 Pa. Koska tuulensuoja-aluskaterakenteen ullakkotila oli ilmatiiveydeltään parempi, niin ilmavirtauksen määrä ullakkotilaan oli referenssikattoa vähäisempää. Tuulensuoja-aluskaterakenteen ullakkotilaan virtaava ilmamäärä oli noin 8 % referenssikattoa pienempi. Tällöin myös tuulensuoja-aluskaterakenteen ullakkotilan kosteusrasitus oli pienempi. Kuvassa (Kuva 37) on esitetty kattotuoleista mitatut kosteuspitoisuudet kokeen toiselta osalta.



Kuva 37: Kattotuolien mitatut kosteuspitoisuudet (maksimiarvo neljästä mittauspisteestä) kokeen toisella osalla. Vasemmalla betonikattotiilikatto ja oikealla peltikatto. [21]

Tuulensuoja-aluskaterakenteessa kosteuspitoisuus oli talvella noin 2 % korkeampi kuin referenssikatoissa. Rakenteen kuivumiskyky oli kuitenkin parempi ja kokeen loppupuolella tuulensuoja-aluskaterakenteen kosteuspitoisuudet olivat referenssikattoa alhaisemmat. Kokeen toisen osan tulokset vastasivat näin kokeen ensimmäisen osan tuloksia.

Kokeen toisessa osassa tutkittiin kosteusteknisen toiminnan lisäksi lämpötekniistä toimintaa. Kuvassa (Kuva 38) on esitetty yhteenveto tutkittujen rakenteiden lämpöhäviöistä. Kuvassa lämpöhäviöt on jaettu ilmavuodon ja johtumisen osuuksiin.



Kuva 38: Yhteenveto tutkittujen rakenteiden lämpöteknisestä toiminnasta tutkimuksen toisessa osassa. [57]

Ideaalin tuulensuoja-aluskaterakenteen, jossa ei ollut ilmavuotoja sisätiloista, kokonaislämpöhäviöt olivat noin 70 % pienemmät kuin perinteisen katon. Epäideaalin (1,5 mm x

1,2 m ilmavuotoraot räystäällä) tuulensuoja-aluskaterakenteen kokonaislämpöhäviöt olivat 2 – 4 % pienemmät kuin perinteisen katon. Ideaalisen, tuulensuoja-aluskaterakenteen kokonaislämpöhäviöt olivat 23 – 25 % perinteistä kattoa pienemmät.

Tutkimuksen johtopäätöksissä todettiin seuraavat asiat:

- Tuulensuoja-aluskaterakenne muodostaa yläpohjan lämmöneristykselle suojan tuulen aiheuttamia virtauksia vastaan. Tämä voi pienentää rakenteen lämpöhäviöitä 2 – 4 % verrattuna perinteiseen kattorakenteeseen. [21]
- Tuulensuoja-aluskaterakenne voi vähentää ilmavuotoja rakenteen läpi. Tämä pienentää ilmavuotojen aiheuttamia lämpöhäviöitä sekä kosteusrasitusta, joka muodostuisi siitä, kun kosteaa sisäilmaa kulkeutuisi kattorakenteisiin ilmavuotojen mukana. Tutkimuksessa mitattu kokonaislämpöhäviö oli 25 % pienempi kuin perinteisen kattorakenteen. [57]
- Kattorakenteen epäideaalinen toteutus voi palauttaa rakenteen lämpöteknisen toiminnan perinteisen katon tasolle. Ullakkotilan sulkeminen aluskatteella täysin ilmatiiviiksi voi olla käytännössä vaikeaa. [21]
- Rakenteen kosteustekninen toiminta on yhtä hyvä kuin perinteisen katon. [21]
- Aluskatteen epäideaalinen asennus, eli aluskatteen asentaminen siten, että aluskate ei ole täysin ilmatiivis, ei vaikuta kattorakenteen kosteustekniseen toimintaan. [21]

5.9 Kattokaltevuuksien vertailua Suomi, Ruotsi ja Norja

Tuulensuoja-aluskaterakennetta voidaan käyttää Pohjoismaista ainakin Ruotsissa ja Norjassa ja Tanskassa. Tässä kappaleessa vertaillaan Suomen, Ruotsin ja Norjan kattojen suositeltuja vähimmäiskaltevuuksia. Tällä lyhyellä tarkastelulla pyritään näyttämään, että kattokaltevuuksissa ei ole merkittäviä eroja ja siten kokemuksia tuulensuoja-aluskaterakenteesta voidaan käyttää Suomessa ja muissa samankaltaisen ilmaston omaavissa maissa. Kattoja verrataan toisiinsa ainoastaan kattokaltevuuksien mukaan. Eri lähteistä löytyy taulukoitua tietoa Ruotsin ja Norjan suositelluista vähimmäiskattokaltevuuksista. Tässä vertailussa on käytetty seuraavia lähteitä [2], [58], [59], [17] ja [5]

Kattokaltevuudet ovat riippuvaisia käytetystä vesikatemateriaalista, vesikatteen alusrakenteesta, aluskatteen käytöstä ja aluskatemateriaalista. Seuraavassa taulukossa (Taulukko 11) on esitetty eri maiden suositellut kattokaltevuudet yksinkertaistettuna taulukkona selityksineen. Taulukossa on esitetty vain yleisimmät käytössä olevat katemateriaalit. Vapaasti asennettavaa aluskatetta käytetään pääasiassa tiili- ja profiilipeltikatteiden alla.

Taulukko 11: Yleisimpien käytössä olevien vesikatemateriaalien vähimmäiskattokaltevuuksien vertailua.

Katemateriaali	Ruotsi	Norja	Suomi
----------------	--------	-------	-------

Rivipeltikate	1:10	1:6, 1:4, 1:3 ⁽³⁾	1:10
Profiilipeltikate	1:10, 1:4 ⁽¹⁾	1:6	1:10, 1:5 ⁽⁶⁾ (1:6 ⁽⁷⁾)
Tiilikate	1:4, 1:2,5, ⁽²⁾	1:4 (1:2,5 ⁽⁴⁾)	1:5, 1:4 ⁽⁸⁾
Palahuopakate	1:3	1:4, 1:3 ⁽⁵⁾	1:5

⁽¹⁾ Riippuen siitä tiivistetäänkö profiilipellin limiliitokset [58]

⁽²⁾ Riippuen siitä käytetäänkö huullettuja tiiliä ja käytetäänkö aluskatteena saumaliimattua aluskatetta vai vettäohjaavaa (levymäistä) [58]

⁽³⁾ Riippuen siitä käytetäänkö levymäistä vai nauhamaista katetuotetta. Jos kattokaltevuus on pienempi kuin 1:3, on saumat tiivistettävä [59]

⁽⁴⁾ Ankarissa ilmasto-oloissa kattokaltevuus 1:2,5 [59]

⁽⁵⁾ Kattokaltevuus 1:4, jos käytetään bitumikermialuskatetta. Kattokaltevuus 1:3, jos käytetään vapaasti asennettavaa aluskatetta [59]

⁽⁶⁾ Poimulevykate 1:10, muotolevykate 1:5 [17]

⁽⁷⁾ RIL 107:n suositus [5]

⁽⁸⁾ Betonitiilikate 1:5, poltettu savitiilikate 1:4 [17]. RIL 107 suositus kattokaltevuudeksi on sekä betonitiilikatteelle että savitiilikatteelle 1:4 [5]

Taulukosta nähdään, että suositukset kattojen vähimmäiskaltevuuksiksi ovat samansuuntaiset kaikissa vertailumaissa. Tiilikaton vähimmäiskaltevuus on jyrkin. Seuraavaksi jyrkin on palahuopakate ja peltikatto voidaan tehdä kaikkein loivimpana. Merkittäviä eroja vähimmäiskaltevuuksissa maiden välillä ei ole. Taulukkoa tulkittaessa täytyy ottaa huomioon, että eri maissa on aina omanlaisensa työtavat ja käytetyt materiaalit. Tämä aiheuttaa sen, että toisessa maassa katto voidaan suositella tehtäväksi pienemmällä kaltevuudella kuin toisessa, vaikka vesikatemateriaali olisi sama. Suomen osalta vähimmäiskaltevuudet olisivat hieman muuttuneet, jos vertailuun olisi otettu Suomen sarakkeeseen ainoastaan RIL 107:n suositukset. RIL 107 suosittelee hieman jyrkempiä kattokaltevuuksia kuin Toimivat katot –julkaisu. Taulukon mukaan loivimmat tiili- ja palahuopakatot voidaan tehdä Suomessa ja loivimmat peltikatot voidaan tehdä Suomessa tai Ruotsissa.

5.10 Yhteenveto kirjallisuusselvityksestä

Tässä kirjallisuusselvityksessä tutkittiin tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttöä Saksassa, Isossa-Britanniassa, Sveitsissä, Tanskassa, Norjassa ja Ruotsissa sekä esiteltiin aiemmin tehtyjä tutkimuksia. Tavoitteena oli tutkia onko rakenne käytössä muualla ja minkälaisia käyttökokemuksia rakenteesta on saatu sekä selvittää mitä tutkimuksia rakenteelle on aiemmin tehty. Selvityksellä ei pyritty ensisijaisesti vastaamaan siihen kuinka yleisesti rakenne on käytössä, vaan lähinnä siihen onko rakenne käytössä, ja jos on, niin millä rajoituksin.

Tuulensuoja-aluskaterakenteen oleellinen osa on diffuusioavoin aluskate, joka on veden- ja tuulenpitävä sekä samalla vesihöyryavoin. Diffuusioavoimia aluskatteita on ollut Euroopassa markkinoilla yli 20 vuotta.

Tällä hetkellä tuulensuoja-aluskaterakenne on yleisesti käytössä tutkituista maista ainakin Saksassa ja Sveitsissä.

Tanskassa ja Norjassa rakenne on hyvin tunnettu, mutta käytön laajuus ei selvinnyt tässä tutkimuksessa. Norjassa valtion tekninen tutkimuslaitos SINTEF on julkaissut rakenteesta yksityiskohtaisen ohjekortin ja rakenne esitetään siellä vaihtoehtoisena yläpohjarakenteena perinteiselle aluskatteen alapuolelta tuuletetulle rakenteelle. Tanskassa diffuusioavoimia aluskatteita on käytetty vinoissa yläpohjarakenteissa yleisesti asentamalla ne suoraan lämmöneristeen päälle.

Isossa-Britanniassa ja Ruotsissa tuulensuoja-aluskaterakenne ei ole vielä yleisesti käytössä, vaikka rakenne on näissä maissa hyvin tunnettu. Isossa-Britanniassa BRE:n tutkimuslaitos on julkaissut ohjekortin tuulensuoja-aluskaterakenteen käytöstä. Ohjekortissa rakenne esitetään vaihtoehtoisena yläpohjarakenteena perinteiselle tuuletetulle yläpohjarakenteelle. Ruotsissa rakennetta on tutkittu usean tutkimuslaitoksen toimesta.

Tuulensuoja-aluskaterakennetta suositellaan käytettäväksi pääasiassa tiili- ja liuskekivikatteiden yhteydessä Saksassa, Isossa-Britanniassa ja Tanskassa. Saattaa olla, että tämänlaiset katot edustavat lukumäärältään suurinta osaa näiden maiden kaikista katoista, mutta tätä ei selvitetty tässä työssä. Muissa tutkituissa maissa vastaavaa suositusta ei tullut esiin.

Eri maiden suositukset aluskatteen vesihöyrynläpäisevyydestä vaihtelevat. Tutkimuksissa on todettu, että rakenne toimii sitä paremmin mitä suurempi on katon alusrakenteen vesihöyrynläpäisevyys. Ei ole kuitenkaan selvää raja-arvoa sille, kuinka pieni vesihöyrynläpäisevyys aluskatteelle kyseisessä rakenteessa sallitaan. Taulukkoon (Taulukko 12) on kerätty aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden raja-arvoja tutkituista maista. Kaikista maista tätä tietoa ei löytynyt.

Taulukko 12: Tuulensuoja-aluskaterakenteessa käytettävän aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden raja-arvoja eräissä Euroopan maissa

Maa	S _d -arvo	Lähde
Iso-Britannia	0,05	[41]
Tanska	0,55	[29]
Norja	0,5	[23]
Ruotsi	0,2	[51], [52]

Taulukosta voidaan huomata, että s_d-arvojen raja-arvot ovat melko suuria kaikissa maissa paitsi Isossa-Britanniassa, kun s_d-arvoja verrataan tällä hetkellä markkinoilla olevien

diffuusioavoimien aluskatteiden s_d -arvoihin. Diffuusioavoimien aluskatteiden s_d -arvot ovat yleisesti luokkaa 0,03 m tai 0,02 m.

Vesikaton kaltevuus ei näyttäisi rajoittavan merkittävästi tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttöä verrattuna aluskatteen alapuolelta tuuletettuun rakenteeseen. Saksassa katon vähimmäiskaltevuus on 1:4 riippumatta siitä onko rakenteena tuulensuoja-aluskaterakenne vai perinteinen tuuletettu rakenne. Norjassa sen sijaan tuulensuoja-aluskaterakenteen vähimmäiskaltevuudeksi on asetettu 1:3, kun perinteisen aluskatteen ylä- ja alapuolelta tuuletetun rakenteen vähimmäiskaltevuus on noin 1:4 (15°). Ruotsissa katon, jossa on tuulensuoja-aluskaterakenne, vähimmäiskaltevuus on 1:4 [51], [52]. Iso-Britannian ja Tanskan vastaavat tiedot eivät selvinneet tässä tutkimuksessa.

Aluskatteen ilma- ja sadevedentiivis asentaminen parantaa rakenteen lämpötekniistä toimintaa ja varmistaa rakenteen hyvän kosteusteknisen toiminnan. Kun aluskate muodostaa toisen ilmatiiviin kerroksen rakenteeseen, niin se vähentää rakenteen läpi meneviä konvektiovirtauksia. Tämä säästää energiaa ja pienentää rakenteen kosteusrasitusta estämällä kostean sisäilman kulkeutumisen rakenteen sisään konvektiovirtausten mukana. Aluskatteen sadevedentiiveyttä voidaan parantaa erilaisilla tiivistystarvikkeilla. Tähän on käytettävissä erilaisia teippejä, massoja, liimoja ja läpivientikappaleita. Saksassa tiili- tai liuskekivikaton tekeminen vähimmäiskaltevuutta (1:2,5) loivemmaksi vaatii aluskatteen sadevedentiiveyden parantamista erityisillä lisätoimenpiteillä. Näitä lisätoimenpiteitä ovat muun muassa aluskatteen asentaminen alustalle (lämmöneriste tai puualusta) ja tarvittavien tiivistystarvikkeiden käyttö sadevedentiiveyden varmistamiseksi.

Sisäpuolisen ilmansulun tiiveys on edellytys rakenteen hyvälle kosteustekniselle toiminnalle. Toisaalta tämä sama pätee myös muille katto- ja ulkoseinärakenteille. Ilmansulun tiiviiden merkitystä kattorakenteen hyvälle kosteustekniselle toiminnalle korostettiin useassa eri lähteessä ([26], [29], [27], ja [21]). Isossa-Britanniassa tuulensuoja-aluskaterakenne on rakennusmääräysten mukaan luvallista rakentaa ainoastaan silloin, kun ilmansulku tehdään erityisen tiiviiksi.

Aluskatteen ja vesikatteen välisen tuuletusvälin suositeltiin Isossa-Britanniassa vähintään 25 mm ja tavallisesti 50 mm. Norjassa tuuletusvälin korkeuteen vaikutti kattolapteen pituus ja kattokaltevuus. Tuuletusvälin vähimmäiskorkeudeksi suositeltiin Norjassa 23 mm – 100 mm taulukon (Taulukko 10) mukaan. Tanskassa tiilikatteellisen katon tuuletusvälin korkeus tulee olla vähintään 22 mm.

Kaiken kaikkiaan tuulensuoja-aluskaterakenne on tunnettu ja käytössä tutkituista maista ainakin Saksassa, Sveitsissä, Isossa-Britanniassa, Tanskassa ja Norjassa. Ruotsissa rakenne on verrattain uusi ja sen käyttöä on tutkittu usean eri tutkimuslaitoksen toimesta. Kaikissa tutkituissa maissa tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttö yläpohjarakenteessa on mahdollista eikä maiden rakennusmääräykset estä rakenteen käyttöä. Tähänastiset käyttökokemukset ja tutkimustulokset kyseisestä rakenteesta ovat hyviä eikä rakenteen ole todettu sisältävän kosteusteknisiä riskejä. Päinvastoin, verrattuna perinte-

seen tuuletettuun rakenteeseen, on tuulensuoja-aluskaterakenteen todettu toimivan joissain tapauksissa jopa paremmin.

6 ALUSKATTEEN VESIHÖYRYNLÄPÄISEVYYSKOE

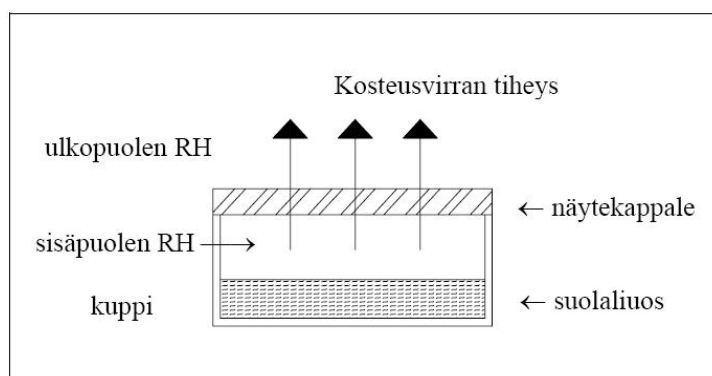
6.1 Johdanto

Työn tavoitteena oli määrittää Vempro R+ -aluskatemateriaalin vesihöyrynläpäisevyys sekä viileissä (+1,5 °C) että kylmissä (-10 °C) olosuhteissa. Aluskatemateriaalille on aikaisemmin määritetty vesihöyrynläpäisevyys +20 °C lämpötilassa, joten työssä pyritään selvittämään vaikuttaako lämpötila aluskatemateriaalin vesihöyrynläpäisevyyteen. Työ tehtiin Vahanen Oy:n laboratoriossa Espoossa helmi-huhtikuussa 2011.

Aluskatemateriaalin vesihöyrynläpäisevyys eri lämpötiloissa määritettiin niin sanottu märkäkuppikokeella. Kokeen pääasiallisena ohjeena käytettiin standardissa EN ISO 12572 (2001) esitettyä menetelmää. Vesihöyrynläpäisevyystestejä kylmissä ja viileissä olosuhteissa on tehty aikaisemmin ainakin Tampereen teknillisellä yliopistolla [60].

6.2 Teoria

Kuppikokeen periaate on esitetty kuvassa (Kuva 39). Tutkittava materiaali on kupin kantena.



Kuva 39: Märkäkuppikokeen periaate [60]

Kupin sisäpuolelle laitetaan kylläistä suolaliuosta, joka tuottaa kuppiin halutun suhteellisen kosteuden. Kupin ulkopuolella suhteellinen kosteus pidetään sisäpuolta alhaisempana, jolloin kupin sisä- ja ulkopuolen välillä vallitsee vesihöyrypitoisuusero. Vesihöyrypitoisuusero saa aikaan kosteusvirran materiaalin läpi. Materiaalin läpi kulkeutuvan kosteusvirran tiheys saadaan selville punnitsemalla kuppia säännöllisesti. Tutkittavan materiaalin vesihöyrynläpäisevyys voidaan määrittää kosteusvirran tiheyden g

(kg/(m²·s)) mukaan. Kosteusvirran tiheys tarkoittaa koekappaleen pinta-alayksikön läpi kulkeutunutta kosteusmäärää aikayksikössä. Se voidaan laskea kaavalla [60]

$$g = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} \quad (24)$$

Δm = koekupin painon muutos (kg)

A = koekappaleen pinta-ala (m²)

Δt ajan muutos (s)

, jossa koekupin painon muutoksen suhde ajan muutokseen, eli tutkittavan materiaalin läpi menevä kosteusvirta, voidaan esittää kaavalla (lähde [61] kaava 1)

$$G = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (25)$$

Kosteusvirran tiheys on tällöin [61]

$$g = \frac{G}{A} \quad (26)$$

Vesihöyrynläpäisevyys voidaan esittää vesihöyryläpäisykerroimen W_p avulla [61]

$$W_p = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} \quad (27)$$

Δp_v = vesihöyrynsapaine-ero kupin sisä- ja ulkopuolen välillä (Pa)

Vesihöyrynläpäisykerroin voidaan esittää vesihöyrynsapaineen sijaan myös vesihöyrypitoisuuden avulla. Ratkaisemalla G kaavasta (26) saadaan

$$G = g \cdot A \quad (28)$$

Sijoittamalla nyt G kaavasta (28) kaavaan (27) ja esittämällä vesihöyrynsapaine-ero vesihöyrypitoisuuksien erona voidaan muuttaa kaava (27) muotoon

$$W_v = \frac{g}{\Delta v} \quad (29)$$

Vesihöyrynläpäisykerroin vesihöyrynsapaine-eron avulla laskettuna voidaan laskea kaavasta

$$W_p = \frac{g}{\Delta p_v} \quad (30)$$

Kaavassa (29) vesihöyrypitoisuusero kupin sisä- ja ulkopuolella voidaan laskea ilman suhteellisten kosteuksien avulla kaavalla [60]

$$\Delta v = \frac{\varphi_s - \varphi_u}{100} v_k \quad (31)$$

φ_s = koekupin sisäpuolen suhteellinen kosteus, jossa on otettu huomioon ilmatilan aiheuttama suhteellisen kosteuden alenema $\Delta\varphi$ (% RH)

φ_u = koekupin ulkopuolen suhteellinen kosteus (% RH)

v_k = vesihöyryn kyllästyskosteus (kg/m^3)

jossa vesihöyryn kyllästyskosteus voidaan laskea kaavalla [2]

$$v_k = 10^{-3} \cdot [4,85 + 3,47(t/10) + 0,945(t/10)^2 + 0,158(t/10)^3 + 0,0281(t/10)^4] \quad (32)$$

t = lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)

Vesihöyrynläpäisevyyden laskennassa voidaan huomioida myös aluskatteen ja mittapään välisen ilmatilan vaikutus (ks. Kuva 41). Kupissa oleva suolaliuos muodostaa kupin ilmatilaan tietyn suhteellisen kosteuden, joka saavutetaan suolaliuoksen pinnan lähellä. Suhteellinen kosteus alenee hieman mentäessä kauemmas suolaliuoksen pinnasta. Kun kyseessä on erittäin hyvin vesihöyryä läpäisevä materiaali, niin matalankin ilmatilan vaikutus voi olla merkittävä.

Suhteellisen kosteuden muutos $\Delta\varphi$ mittapään ja aluskatteen alapinnan välillä voidaan laskea kaavalla [60]

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta v_{\text{ilmatila}}}{v_k} \cdot 100 \quad (33)$$

, jossa vesihöyrypitoisuusero $\Delta v_{\text{ilmatila}}$ mittapään ja aluskatteen alapinnan välillä voidaan laskea kaavalla (lähde [60] kaava 5.14 muutettu laskettavaksi vesihöyrypitoisuuden avulla)

$$\Delta v_{\text{ilmatila}} = \frac{d}{\delta_{v_ilma}} \cdot g \quad (34)$$

Vesihöyrynläpäisykertoimen käänteisarvo on vesihöyrynvastus

$$Z_v = \frac{1}{W_v} \quad (35)$$

Vesihöyrynvastus voidaan esittää myös vesihöyryn osapaine-eron avulla laskettuna kaavalla

$$Z_p = \frac{1}{W_p} \quad (36)$$

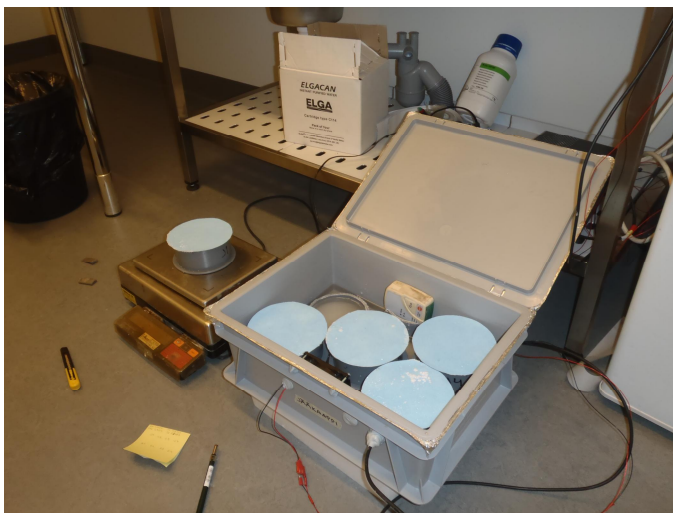
Eräs havainnollinen tapa kuvata materiaalin vesihöyrynläpäisevyys on esittää se ekvivalenttina ilmakerroksen paksuutena, eli s_d -arvona. S_d -arvo kertoo kuinka paksua ilmakerrosta materiaalin vesihöyrynvastus vastaa. S_d -arvo voidaan laskea halutussa lämpötilassa yhdistämällä kaavat (15) ja (17) ja sijoittamalla ne kaavaan (18), jolloin saadaan s_d -arvolle kaava

$$s_d = Z_v \cdot 135,2 \cdot 10^3 \cdot (164,2 + 1,04 \cdot t) \cdot 10^{-12} \quad (37)$$

Kaavat (15), (17) ja (18) on esitetty aikaisemmin tässä työssä sivulla 9.

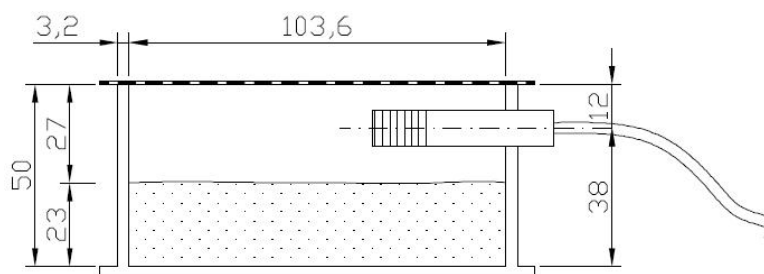
6.3 Koejärjestely

Kuppikokeet tehtiin kahdessa eri lämpötilassa (+3,7 °C ja -10,3 °C). Sopivat lämpötilat saatiin aikaiseksi tekemällä kuppikoe sekä jääkaapissa että pakastimessa. Sopivat kosteusolosuhteet saatiin aikaiseksi säilyttämällä kuppeja suljetussa muovilaatikossa punnituksen välissä. Kupit numeroitiin sen mukaan pidettiinkö niitä kokeessa jääkaapissa vai pakastimessa. Jääkaapin kuppien numerot olivat J1, J2, J3 ja J4. Pakastimen kuppien numerot olivat P1, P2, P3 ja P4. Kuvassa on periaatekuva koejärjestelyistä (Kuva 40).



Kuva 40: Koejärjestelyt. Muovinen tutkimuslaatikko suljettiin tiiviiksi alumiiniteipillä. Tutkimuslaatikkoon sijoitettiin kuppien lisäksi tuuletin ja loggeri. Yhteen kupeista asennettiin kosteutta ja lämpötilaa mittaava mittapää (Vaisala Oy).

Koekuppeina käytettiin PVC-muovista valmistettua viemärin päätetulppaa (Uponor). Kupin halkaisija oli 110 mm ja kupin reunan paksuus oli 3,2 mm, jolloin kupin sisähalkaisija oli 103,6 mm. Aluskatemateriaalista leikattiin ympyrän muotoinen halkaisijaltaan hieman kuppia suurempi pala, joka liimattiin kupin päälle polyuretaanipohjaisella saumamassalla (Sikaflex® 11 FC+). Kuppeihin laitettiin ylikylläinen suolaliuos, jolla saatiin aikaa kupin sisälle haluttu suhteellinen kosteus. Kuvassa (Kuva 41) on esitetty periaatekuva yhdestä kupista mittoineen.



Kuva 41: Periaatekuva kupista, jossa mittapää. Yhteen viidestä kupista sijoitettiin mittapää mittaamaan kupin sisäpuolen suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. Muissa kupeissa mittapäätä ei ollut.

Yhdessä kuppikokeessa kuppien lukumäärä oli viisi kappaletta. Näistä neljää punnittiin noin viikon välein. Aiemmista tutkimuksista [60] tiedettiin, että hyvin vesihöyryä läpäisevällä materiaalilla kupissa oleva ylikylläinen suolaliuos ei pysty ylläpitämään liuokselle ominaista suhteellista kosteutta (tässä tapauksessa RH 85 %). Niinpä kupin sisäpuolinen kosteus mitattiin HMP44-mittapäällä (Vaisala Oy) tutkittavan materiaalin alapinnan lähellä (Kuva 41). Kuppien sisäpuolisten kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden oletettiin olevan kaikissa kupeissa samanlaiset, ja ne määritettiin mittapäällä varustetusta kupista.

Koetta varten rakennettiin tutkimuslaatikko, jonne kupit sijoitettiin. Tutkimuslaatikolla saatiin aikaiseksi kuppien ulkopuolelle riittävän vakiot kosteusolosuhteet. Laatikon pohjalle laitettiin ylikylläistä suolaliuosta, joka muodosti laatikon sisälle halutun suhteellisen kosteuden. Laatikon pohjalle laitettiin suolaliuosta aluksi noin 15 mm ja kokeen aikana suolaa lisättiin laatikkoon, jotta liuos pysyisi kylläisenä koko kokeen ajan. Laatikkoon asennettiin tuuletin, jolla saatiin aikaiseksi ilman kiertoa laatikon sisällä.

Kupin sisällä käytettiin suolana Kaliumkloridia (KCl) ja kupin ulkopuolella laatikossa suolana käytettiin Magnesiumkloridia ($MgCl_2+6H_2O$).

Kupin sisäpuolen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet mitattiin HMP-44 mittapäällä ja mittaustulokset tallennettiin jääkaapin ja pakastimen ulkopuoliseen dataloggeriin (Grant: Squirrel 2040 data logger series). Mittapäät kalibroitiin ennen koetta ja kokeen jälkeen.

Kuppien ulkopuolen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet kokeen aikana mitattiin ja tallennettiin tutkimuslaatikkoon sijoitettuun dataloggeriin (jääkaapissa Testo 175 H1 ja pakastimessa Testo 175 H2). Testo-dataloggerit oli kalibroitu lokakuussa 2010. Dataloggerin näyttämiä suhteellisen kosteuden arvoja korjattiin dataloggereiden kalibroinnista saatavalla korjaustermillä (liite 2).

Koekappaleet punnittiin noin viikon välein. Punnitsemiseen käytettiin Sartorius 14800P-vaakaa, jonka tarkkuus on 0,01 g. Kupit punnittiin huoneenlämmössä. Punnituksen aikana kupit olivat tutkimuslaatikossa lukuun ottamatta punnittavaa kuppia. Jääkaapin tutkimuslaatikko oli punnituksen ajan huoneenlämmössä ja pakastimen tutkimuslaatikko oli punnituksen ajan pakastimessa, jonka ovi oli auki. Punnitukseen kului aikaa noin 10 minuuttia laatikkoa kohden.

6.4 Mittaustulokset ja havainnot

Kupin sisä- ja ulkopuolen kosteus- ja lämpötilan olosuhteita tarkasteltiin koko kokeen ajan. Olosuhteet tallennettiin 15 minuutin välein. Kosteusvirran tasaantuneen vaiheen keskimääräiset lämpötilat ja kosteudet on esitetty taulukossa (Taulukko 13). Taulukon arvoista lämpötilat ja kupin sisäpuoliset suhteelliset kosteudet on mitattu HMP44-mittapäällä (Vaisala Oy). Kupin ulkopuoliset suhteelliset kosteudet on mitattu dataloggereilla (Testo 175 H1 ja Testo 175 H2).

Taulukko 13: Keskimääräiset suhteelliset kosteudet kuppien sisä- ja ulkopuolella kosteusvirran tasaantuneelta ajanjaksolta.

	T (°C)	RH kupin ulkopuolella (%)	RH kupin sisäpuolella (%)
Jääkaappi	+3,7	45,5	77,5
Pakastin	-10,3	42,3	70,8

Koe tehtiin yhdellä kosteusparilla. Tutkittavan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden oletetaan pätevän näiden suhteellisten kosteuksien puolivälissä [60].

Kuppeja punnittiin noin viikon välein. Taulukossa (Taulukko 14) on esitetty kuppien painot kokeen aikana.

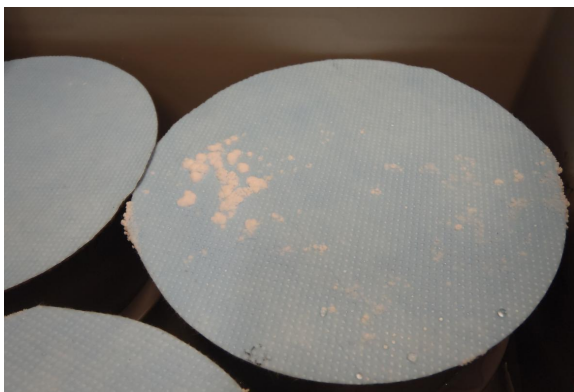
Taulukko 14: Kuppien painot grammoina kokeen aikana.

Punnitus pvm	+3,7 °C (jääkaappi)				-10,3 °C (pakastin)			
	J1	J2	J3	J4	P1	P2	P3	P4
10.2.	322,52	321,28 g	319,29	328,69	325,31	327,79	340,68	322,52
15.2.	317,64	316,02	313,68	324,12	323,27	325,67	338,57	317,64
22.2.	311,74	309,52	306,94	318,75	320,85	323,07	336,00	311,74
25.2.	309,40	307,90	304,32	316,48	319,83	322,04	335,01	309,4
4.3.	303,84	301,78	298,06	312,40	317,46	319,71	332,50	303,84
11.3.	298,40	296,03	291,63	307,85	315,08	317,36	330,23	298,4
18.3.	292,71	289,13	283,02	300,03	312,56	314,41	327,40	292,71
25.3.	284,66	283,79	273,74	294,92	310,26	311,99	325,02	284,66
1.4.	278,98	278,13	265,39	289,89	307,66	309,37	322,33	278,98

Koe aloitettiin helmikuun 10. päivä ja viimeinen punnitus suoritettiin 1. huhtikuuta. Kokeen aikana havaittiin, että yhdestä kupista (J3) haihtuu nestettä huomattavasti muita kuppeja enemmän. Tämä kuppi aiheutti tuloksiin suurta hajontaa ja oli perusteltua epäillä, että ottamalla tämä kuppi huomioon vesihöyrynläpäisevyyttä laskettaessa saattaa se johtaa virheelliseen lopputulokseen. Tästä johtuen kuppia J3 ei ole huomioitu tulosten laskennassa. Kupin J3 vaikutuksia lopputuloksiin on tarkasteltu kappaleessa 6.6.

Punnituksessa 18.3. huomattiin, että jääkaapissa olevien kuppien pohjissa oli suolaliuosta. Suolaliuosta on todennäköisesti ollut kuppien pohjissa vähäisiä määriä myös aikaisemmissa punnituksissa. 18.3. jälkeisillä punnituskerroilla kupit pyyhittiin kuivaksi ennen punnitusta.

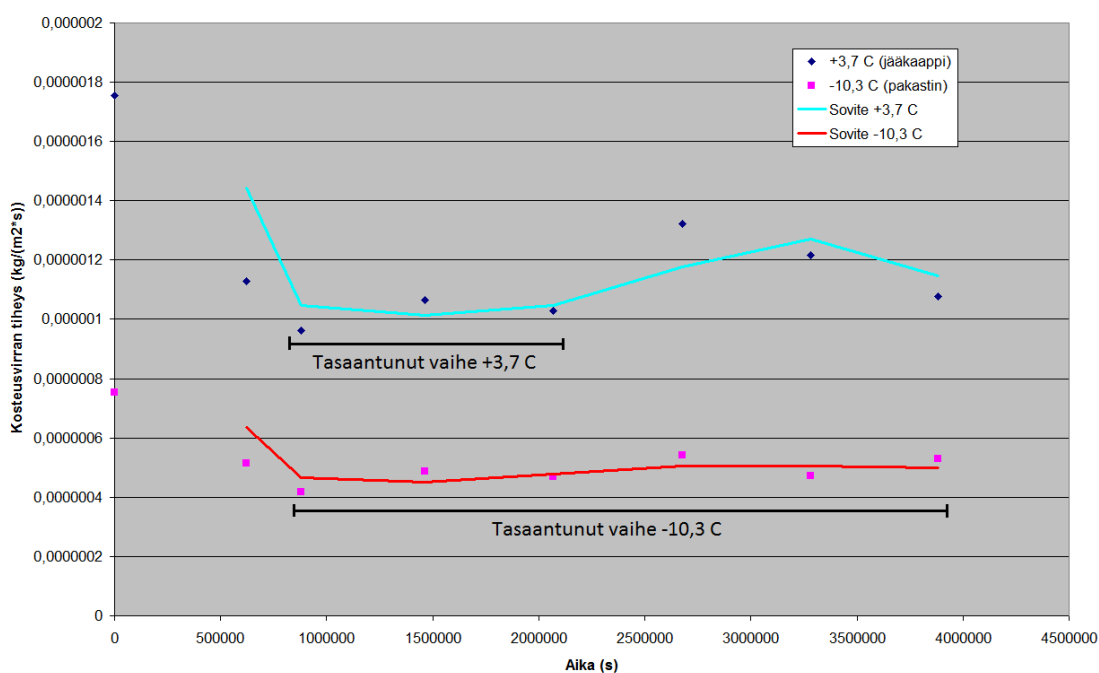
Punnituksessa 25.3. huomattiin, että muutama jääkaapissa olevaan kuppiin oli kerääntynyt suolaa aluskatemateriaalin pintaan ja reunoille (Kuva 42). Aluskate oli näiltä osin kovettunut.



Kuva 42: Suolan kerääntymistä aluskatteen pintaan ja reunoille kokeen loppupuolella.

6.5 Tulosten laskenta

Jokaiselle kupille laskettiin painon muutoksen avulla kosteusvirran tiheys kaavalla (24). Kokeen aikana kosteusvirran tiheys aluskatemateriaalin läpi ei ole koko aikaa tasainen. Kosteusvirran tiheys on aluksi suuri, ja kokeen edetessä se tasaantuu, kun materiaalit saavuttavat tasapainokosteuden. Kuvassa (Kuva 43) on esitetty kosteusvirran tasaantuminen kokeen aikana. Kosteusvirran tiheyden arvona on käytetty kuppien kosteusvirtojen tiheyksien keskiarvoa. Yksittäisten kuppien kosteusvirran tiheydet ajan suhteen on esitetty liitteessä (LIITE 1)



Kuva 43: Kosteusvirtojen tasaantuneet ajanjaksot.

Ylemmän käyrän (+3,7 °C) hyppäys kosteusvirran tiheydessä kuudennen mittapisteen kohdalla johtuu kuppien punnituksessa tapahtuneesta virheestä. Ensimmäisissä punnituksissa kuppien pohjaan oli jäänyt suolaliuosta tutkimuslaatikon pohjalta. Kuudennessa ja sitä myöhemmissä punnituksissa kupit pyyhittiin kuivaksi. Tämä vaikutti kuppien

painoon ja aiheutti siten virheen kosteusvirran tiheyden laskenta-arvossa. $-10,3\text{ °C}$ lämpötilassa samaa virhettä ei tapahtunut, koska $-10,3\text{ °C}$ lämpötilassa tutkimuslaatikon pohjalla ei ollut niin paljoa suolaliuosta kuin $+3,7\text{ °C}$ lämpötilassa.

$+3,7\text{ °C}$ lämpötilassa kuppien kosteusvirta ei tasaantunut kuudennen mittapisteen jälkeen enää kokeen aikana. Tähän on voinut vaikuttaa aluskatemateriaaliin kerääntynyt suola, joka on saattanut vaikuttaa aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyteen. Aluskatemateriaaliin kerääntynyttä suolaa havaittiin kahdessa viimeisessä punnituksessa.

Vesihöyrynläpäisevyyden eri yksiköiden laskennassa on otettu huomioon mittauspisteet kosteusvirran tasoittuneelta ajanjaksolta (ks. Kuva 43). $+3,7\text{ °C}$ lämpötilassa mukaan laskettavia mittauspisteitä on kolme. Kun punnittavia kuppeja oli tässä lämpötilassa kolme, niin onnistuneita punnituksia tuli yhteensä yhdeksän kappaletta. $-10,3\text{ °C}$ lämpötilassa mukaan laskettavia mittauspisteitä on kuusi. Kun punnittavia kuppeja oli tässä lämpötilassa neljä, niin onnistuneita punnituksia tuli yhteensä 24 kappaletta. Laskennassa on käytetty kosteusvirran tiheyksien keskiarvoja. Aluskatemateriaalille lasketut vesihöyrynläpäisevyyden eri yksiköt on esitetty taulukossa (Taulukko 15)

Taulukko 15: Aluskatemateriaalin vesihöyrynläpäisevyyden eri yksiköt

Nimi	Merkintä	Yksikkö	Kaava	Lämpötila	
				$+3,7\text{ °C}$	$-10,3\text{ °C}$
Vesihöyrynläpäisykerroin	W_v	m/s	(29)	$0,76 \cdot 10^{-3}$	$0,47 \cdot 10^{-3}$
Vesihöyrynläpäisykerroin	W_p	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	(30)	$5,9 \cdot 10^{-9}$	$3,9 \cdot 10^{-9}$
Vesihöyrynvastus	Z_v	s/m	(35)	$1,3 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$
Vesihöyrynvastus	Z_p	$\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$	(36)	$0,17 \cdot 10^9$	$0,26 \cdot 10^9$
Ekvivalentti ilmakerroksen paksuus	S_d	m	(37)	0,030	0,044

6.6 Virhearviointi

Aluskatemateriaalin vesihöyrynläpäisevyyteen vaikuttavaa virhettä arvioitiin mittaustulosten hajonnan perusteella. Sen avulla voidaan ottaa huomioon muun muassa

- aluskatemateriaalin laadun epätasaisuus
- punnitusvaa'an epätarkkuus
- vähäiset virheet ja vauriot aluskatemateriaalin tiivistyksessä

Laskemalla kaikkien kuppien kosteusvirtojen tiheyksien mittaustuloksista keskihajonta ja keskiarvon keskivirhe saatiin käsitys virheen suuruusluokasta. Taulukossa (Taulukko 16) on esitetty virhettä kuvaavat tunnusluvut.

Taulukko 16: Kuppien kosteusvirtojen tiheyksien ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) keskiarvot, keskihajonnat ja keskiarvon keskivirhe kosteusvirran tasaantuneelta ajanjaksolta.

	+3,7 °C (jääkaappi)	-10,3 °C (pakastin)
Keskiarvo	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$0,49 \cdot 10^{-6}$
Keskihajonta	$0,16 \cdot 10^{-6}$	$0,060 \cdot 10^{-6}$
Keskiarvon keskivirhe	$0,053 \cdot 10^{-6}$	$0,012 \cdot 10^{-6}$

Mittaustulosten suuri hajonta +3,7 °C lämpötilassa johtuu pääasiassa punnituksessa tapahtuneesta virheestä ja onnistuneiden mittaustulosten vähyydestä. -10,3 °C lämpötilassa hajonta oli selvästi pienempää.

Keskiarvon keskivirheen perusteella voidaan laskea virheen vaikutus aluskatemateriaalin s_d -arvoon. Sen avulla voidaan ilmoittaa rajat, joiden sisään aluskatemateriaalin todellinen s_d -arvo sijoittuu tietyllä todennäköisyydellä. Normaalisti jakautuneille mittaustuloksille todennäköisyys on 68,3 % [62]. Keskiarvon keskivirheen vaikutus s_d -arvoon on +3,7 °C lämpötilassa $\pm 0,002$ m ja -10,3 °C lämpötilassa $\pm 0,0015$ m. Vaikutus s_d -arvoon on miltei sama sekä +3,7 °C lämpötilassa että -10,3 °C lämpötilassa, vaikka +3,7 °C lämpötilassa mittaustuloksia on paljon vähemmän ja keskihajonta on suurempi. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että kosteusvirran tiheys on +3,7 °C lämpötilassa suurempi, jolloin virheellä ei ole niin suurta vaikutusta lopputulokseen. Virheraja $\pm 0,002$ m tarkoittaa sitä, että jos koe suoritettaisiin uudelleen, niin on 68,3 % todennäköisyys, että aluskatemateriaalin s_d -arvo pysyisi näiden ilmoitettujen rajojen sisällä. [62]

Mittaustulosten hajonnan perusteella lasketun virheen lisäksi tulee ottaa huomioon mahdolliset systemaattiset virhelähteet, jotka ovat peräisin koejärjestelyistä. Näitä ovat

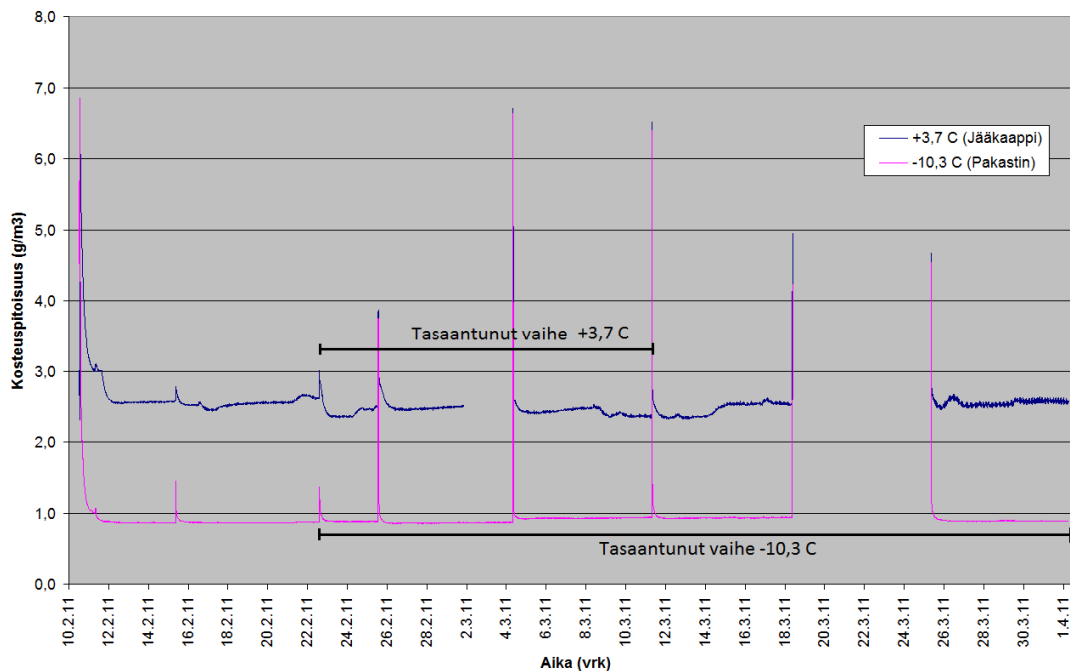
- olosuhteita mittaavien mittalaitteiden epätarkkuudet
- olosuhteiden vaihtelusta syntyvä virhe
- mittapään sijainnin epätarkkuus kupissa

Kuppien sisäpuolista suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin yhteen kuppiin sijoitetulla mittapäällä (HMP44 – Vaisala Oy). Mittapää kalibroitiin ennen koetta ja kokeen jälkeen. Kokeen jälkeen mittapää näyttivät hieman eri arvoja suhteelliselle kosteudelle ja lämpötilalle kuin ennen koetta. S_d -arvoon mittapään uudelleen kalibrointi vaikutti siten, että kokeen jälkeen kalibroituilla arvoilla laskettuna s_d -arvo oli 0,001 m enemmän sekä +3,7 °C lämpötilassa että -10,3 °C lämpötilassa.

Kuppien ulkopuolista suhteellista kosteutta mitattiin tutkimuslaatikkoon sijoitetulla dataloggerilla. Dataloggerit oli kalibroitu 10/2010. Dataloggerin epätarkkuuden oletettiin olevan tuloksen kannalta merkityksetön.

Olosuhteita tarkasteltiin kokeiden ajan sekä jääkaapista, että pakastimesta. Jääkaappi oli kokeen aikana muussakin käytössä, joten jääkaapin oven avaaminen muutti aina het-

kellisesti jääkaapin olosuhteita. Kupit olivat suljetussa muovilaatikossa, joten jääkaapin oven avaaminen vaikutti hetkellisesti lähinnä jääkaapin lämpötilaan, muttei niinkään kupprien ulkopuolella olevaan ilman kosteuspitoisuuteen (g/m^3). Kuvassa (Kuva 44) on esitetty kupprien ulkopuolinen ilman kosteuspitoisuus kokeen ajalta.



Kuva 44: Kupprien ulkopuolinen ilman kosteuspitoisuus $+3,7\text{ °C}$ ja $-10,3\text{ °C}$ lämpötilassa.

Kuvasta huomataan, että jääkaapin olosuhteet vaihtelivat enemmän kuin pakastimen. Hetkellisesti huomattavan korkeat tai alhaiset piikit suhteellisen kosteuden arvoissa johtuvat punnituksen aikaisista poikkeavista olosuhteista. Kosteuspitoisuuden $+3,7\text{ °C}$ lämpötilan kuvaajasta puuttuu tiedot väliltä 1.3. – 4.3. Tähän oli syynä dataloggerin tallennuskapasiteetin täytyminen. Kosteuspitoisuuden kuvaajasta puuttuu tiedot sekä $+3,7\text{ °C}$ lämpötilan kuvaajasta että $-10,3\text{ °C}$ lämpötilan kuvaajasta väliltä 18.3. – 25.3. Suhteellisen kosteuden arvoja ei tallennettu dataloggerilta tietokoneelle inhimillisen erehdyksen johdosta. Koe oli 1.3. – 4.3. sekä 18.3. – 25.3. välisinä aikoina normaalisti käynnissä eikä olosuhteissa ollut noina aikoina merkittäviä muutoksia.

Mittapäättä ei pystytty sijoittamaan kuppiin ”millintarkasti”, vaan mittapäällä oli mahdollisuus liikkua hieman pystysuunnassa. Mittapään sijoituksen epätarkkuus oli noin $\pm 0,004\text{ m}$. Koska aluskatteen s_d -arvo lasketaan ekvivalenttina ilmakerroksen paksuutena, niin mittapään epätarkalla sijoituksella on suora vaikutus aluskatteelle lasketuun s_d -arvoon. Esimerkiksi jos mittapää sijaitsee 1 millimetrin lähempänä aluskatetta kuin on oletettu, niin laskettu s_d -arvo näyttää $0,001\text{ m}$ liian suurta arvoa. Tällä on suhteellisen suuri vaikutus laskennan tarkkuuteen.

Kaikkien virheiden yhteisvaikutusta voidaan arvioida likiarvokaavalla

$$\Delta x \approx \sqrt{m_x^2 + m_1^2} \quad (38)$$

m_x = s_d -arvon keskiarvon keskivirhe laskettuna mittaustuloksista (m)

m'_x = s_d -arvon virhe, jossa on laskettu yhteen mittalaitteiden epätarkkuuden virhe ja mittapään sijoittamisen epätarkkuus (m)

Virheen kokonaisvaihteluväliksi saadaan kaavalla (38) +3,7 °C lämpötilassa

$$\Delta x_1 \approx \sqrt{0,002^2 + (0,001 + 0,004)^2} m^2 = 0,0054m$$

ja -10,3 °C lämpötilassa

$$\Delta x_2 \approx \sqrt{0,0015^2 + (0,001 + 0,004)^2} m^2 = 0,0050m$$

Vesihöyrynläpäisevyyskokeesta saadun aluskatteen s_d -arvon vaihteluväli on esitetty taulukossa (Taulukko 17)

Taulukko 17: Aluskatteen s_d -arvon vaihteluvälit eri lämpötiloissa

	sd-arvo (m)
+3,7 °C (jääkaappi)	0,025 – 0,035
-10,3 °C (pakastin)	0,039 – 0,049

Yksi kuppi (J3) hylättiin kokeessa. Kupin J3 laskennasta poisjättäminen lisäsi mittaustulosten tarkkuutta. Jos kuppi otettaisiin laskentaan mukaan, niin se pienentäisi aluskatteen s_d -arvoa hieman (noin 0,002 m). Tällä ei ole kuitenkaan merkittävää vaikutusta, koska diffuusioavoimien aluskatteiden s_d -arvo pyöristetään tyypillisesti sadasosan tarkkuuteen.

Poikkeaminen standardista

Kuppikokeessa on käytetty periaatteellisenä ohjeena standardia EN ISO 12572 (2001). Seuraavassa on esitetty kohdat, joissa poikettiin tämän standardin suosituksista.

Standardi ei sovellu erittäin hyvin vesihöyryä läpäiseville materiaaleille. Standardi on määritetty materiaaleille, joiden s_d -arvo on suurempi kuin 0,1 m. Tämä johtuu siitä, että mittaustulosten epätarkkuus kasvaa, jos kuppikoe tehdään erittäin hyvin vesihöyryä läpäisevälle materiaalille.

Kokeessa oli liian vähän testikappaleita. Halkaisijaltaan 103,6 mm kuppeja pitäisi olla standardin mukaan vähintään 5 kappaletta, kun tässä kokeessa niitä oli vain 4 kappaletta.

Kupit punnittiin liian lämpimässä. Kupit pitäisi standardin mukaan punnita olosuhteissa, joiden lämpötila ei eroa koeolosuhteista enempää kuin ± 2 °C. Tällä on merkitystä varsinkin silloin, kun kuppien punnitusten aikaväli on lyhyt, jolloin punnitusten ajan poikkeusolosuhteiden kesto voi vaikuttaa kokonaisajan olosuhteisiin. Tällä on merkitys-

tä myös silloin kun kupeista haihtuu suhteellisen vähän kosteutta. Tällöin kuppien pintaan mahdollisesti kondensoituva ilmankosteus vaikuttaa kuppien painoon.

Kupeissa olevan suolaliuoksen pinnan ja aluskatemateriaalin välinen ilmatila oli liian korkea. Standardin mukaan ilmatilan korkeus tulee olla kupissa 15 ± 5 mm. Koeksessa kuppien ilmatilan korkeus oli noin 27 mm. Tämä johtui yhteen kuppiin sijoituksesta HMP44-mittapäästä, jota ei voitu sijoittaa aivan vedenpintaan tai aluskatemateriaaliin kiinni (ks. Kuva 41).

Mittaustulosten hajonta oli liian suuri. Tämä johtui siitä, että kupeista haihtuvan kosteuden määrä vaihteli eri kupeissa. Tämän voi huomata selvästi aiemmin esitetystä taulukosta (Taulukko 14), jossa on esitetty kuppien painon muutokset. Vaihtelut haihtuneen kosteuden määrässä vaikuttivat myös laskettuihin kosteusvirtojen tiheyksiin. Kosteusvirtojen tiheyksiä voidaan vertailla laskemalla yksittäisen kupin kosteusvirran tiheyden poikkeama kosteusvirtojen tiheyksien keskiarvosta (Taulukko 18).

Taulukko 18: Kosteusvirran tiheyden poikkeama keskiarvosta. Vihreällä pohjalla on esitetty mittaustulokset kosteusvirran tasaantuneelta ajanjaksolta.

	+3,7 °C (jääkaappi)			-10,3 °C (pakastin)			
	J1	J2	J4	P1	P2	P3	P4
10.2.2011 12:45							
15.2.2011 8:40	0,48 %	-7,27 %	6,80 %	3,09 %	-0,71 %	-0,24 %	-2,14 %
22.2.2011 13:50	0,39 %	-9,74 %	9,34 %	10,29 %	3,61 %	4,73 %	-18,63 %
25.2.2011 13:00	-12,68 %	21,99 %	-9,31 %	-13,33 %	-14,44 %	-10,00 %	37,78 %
4.3.2011 7:35	-5,84 %	-16,50 %	22,34 %	1,56 %	3,22 %	-4,26 %	-0,52 %
11.3.2011 7:30	-3,68 %	-9,59 %	13,28 %	0,52 %	1,78 %	5,12 %	-7,42 %
18.3.2011 8:55	16,36 %	-1,42 %	-14,94 %	9,27 %	-6,21 %	-1,89 %	-1,17 %
25.3.2011 7:45	-30,54 %	13,41 %	17,14 %	3,77 %	-1,26 %	0,42 %	-2,93 %
1.4.2011 6:40	-4,09 %	-3,73 %	7,82 %	3,26 %	2,51 %	-0,09 %	-5,67 %

Taulukosta voidaan huomata, että jääkaapissa olleissa kupeissa on huomattavasti enemmän poikkeamaa kuin pakastimessa olleissa kupeissa. Standardin EN ISO 12572 mukaan koe on onnistunut, kun viidessä perättäisessä punnituksessa minkään yksittäisen kupin kosteusvirran tiheys ei poikkea keskiarvosta yli 5 %. Taulukon arvot poikkeavat keskiarvosta selvästi enemmän.

6.7 Yhteenveto vesihöyrynläpäisevyyskokeesta

Vesihöyrynläpäisevyyskokeesta saatiin aluskatteen s_d -arvoksi taulukon (

Taulukko 19) mukaiset arvot.

Taulukko 19: Vempro R+ -aluskatteen s_d -arvo eri lämpötiloissa

Lämpötila	s_d -arvo (m)
+3,7 °C	0,030
-10,3 °C	0,044

Aluskatteelle aikaisemmin määritetty s_d -arvo +20 °C lämpötilassa on 0,03 m. Aluskatteen vesihöyrynläpäisevyys ei näin ollen näyttäisi muuttuvan välillä +3,7 °C...+20 °C. Mentäessä reilusti pakkasen puolelle (-10 °C) vesihöyrynläpäisevyys näyttäisi hieman pienenevän, joten tehdyn vesihöyrynläpäisevyyskokeen mukaan lämpötilalla näyttäisi olevan pieni, muttei merkittävä, vaikutus aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyteen.

Mahdollista virhettä aiheutui kokeeseen olosuhteiden vaihteluista, punnituksessa syntyneestä virheestä sekä mittapään sijoittamisesta kuppiin. Virhe ilmenee osaksi mitaustulosten suurena hajontana sekä systemaattisena virheenä, jonka lähteenä ovat vaihtelut kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa sekä koejärjestelyissä.

Mittaustuloksissa oli jonkin verran hajontaa. Hajonta oli suurempaa +3,7 °C lämpötilassa kuin -10,3 °C lämpötilassa. Tämä johtui pääasiassa punnituksessa tapahtuneesta virheestä sekä onnistuneiden mitaustulosten vähyydestä. Mittaustulosten avulla lasketut aluskatteen s_d -arvot olivat kuitenkin hyvin samansuuntaisia, joten hajonta ei ollut merkittävän suurta.

Kokeen otos oli suhteellisen pieni, kun koe tehtiin ainoastaan yhdellä kosteusparilla ja kuppeja oli kokeessa alle standardin määrittelemän määrän. Lisäksi virhearvioinnista saatu s_d -arvon vaihteluväli oli suhteellisen suuri. Näin ollen kokeen tuloksia ei voida pitää täysin luotettavina, mutta niitä voidaan pitää suuntaa antavina tuloksina.

7 RAKENTEEN LASKENNALLINEN TARKASTE- LU

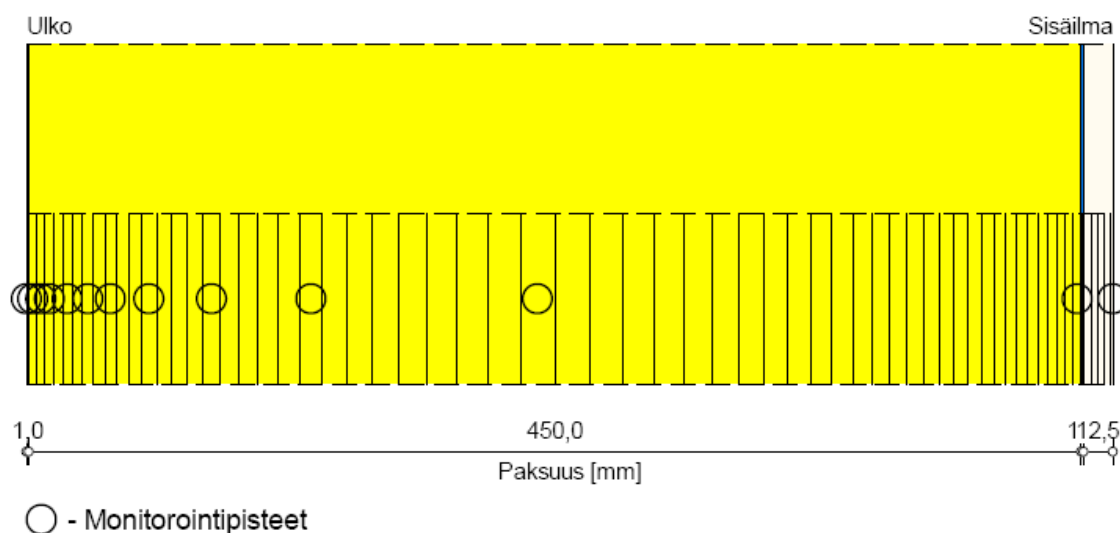
Rakenteen kosteusteknisen toiminnan laskennallinen tarkastelu tehdään WUFI Pro laskentaohjelman versiolla 4.2. Tämä ohjelma on tarkoitettu yksiulotteiseen lämmön ja kosteuden siirtymisen tarkasteluun vaihtelevissa olosuhteissa. Ohjelmalla on mahdollista ottaa huomioon ulko- ja sisäpuolisen lämmön ja kosteuden lisäksi muun muassa auringon säteilyn, vesisateen ja kosteuden faasimuutoslämmön vaikutukset rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen. Laskennasta saadaan selville rakenteen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet halutussa rakenteen pisteessä jokaisella ajan hetkellä.

Laskentaohjelmalla saatujen kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden perusteella lasketaan rakenteelle homeen kasvun riskiä kuvaava homeindeksi. Homeindeksillä voidaan arvioida rakenteen toimintaa vaihtelevissa lämpötila ja kosteusolosuhteissa. Homeindeksistä on kerrottu aikaisemmin tämän työn kappaleessa 3.3.

Laskennassa käytetty homemalli on Excel-pohjainen laskentataulukko. Homeindeksin laskentaan käytetyt kaavat on poimittu lähteistä [13] ja [14]. Työssä käytetyn Excel-laskentataulukon kaavat on tarkistettu vertaamalla sitä Tampereen teknillisellä yliopistolla tehtyyn Excel-pohjaiseen homeindeksin laskentataulukkoon.

7.1 Laskentamalli

Kuvassa (Kuva 45) on esitetty laskentaan käytetyn mallin rakennekerrokset ja niiden paksuudet.



Kuva 45: Laskennassa käytetty rakennemalli.

Rakenne mallinnetaan ilman vesikatetta ja tuuletusväliä, jolloin rakenteen kosteustekninen toiminta on niin sanotusti varmalla puolella (ks. LIITE 3 ja LIITE 4). Vesikatteella ja tuuletusvälillä on rakenteelle edullinen vaikutus erityisesti talvella, kun katolla on lunta ja tuuletusvälin lämpötila on ulkoilmaa hieman korkeampi.

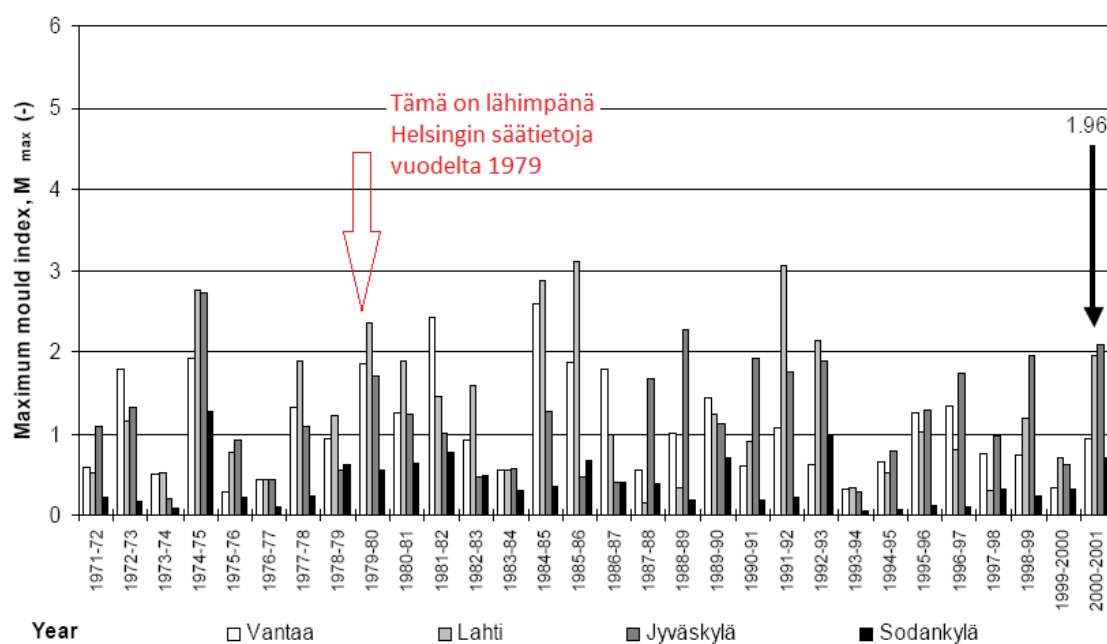
7.2 Lähtöarvot

7.2.1 Ilmasto

Laskennassa on käytetty ulkoilman olosuhteina vuoden 1979 Helsingin säätietoja. Sää-tiedot perustuvat Ilmatieteen laitoksen julkaisemaan niin sanottuun testivuoden säätietoihin.

Arvioitaessa homeen kasvun riskiä tulisi säätietoina käyttää tähän tarkoitukseen sopivaa referenssivuotta, joka on homeen kasvun kannalta kriittisin. Eräässä tutkimuksessa referenssivuodeksi on määritetty säätiedot Lahdesta kesäkuusta 2000 heinäkuuhun 2001 [15]. Tämä referenssivuosi on määritetty siten, että homeindeksi laskettuna tämän

vuoden säätiedoilla on suurempi kuin 90 %:ssa tarkastelluista tapauksista. Tarkasteltuja tapauksia on laskettu viideltä eri paikkakunnalta 30 vuoden ajalta vuosina 1971–2001 (Kuva 46).



Kuva 46: Homeindeksi laskettuna eri paikkakuntien säätiedoilla 30 eri tarkasteluvuonna [15].

Tässä työssä on käytetty Helsingin vuoden 1979 säätietoja. Kuvan perusteella voidaan arvioida karkealla tarkkuudella sitä, miten hyvin Helsingin säätiedot eroavat referenssi-vuoden olosuhteista tarkasteltaessa homeen kasvun riskiä. Kuvan mukaan homeindeksi laskettuna Helsingin 1979–80 säätiedoilla ei poikkea merkittävästi referenssivuoden homeindeksistä, kun homeen kasvua tarkastellaan pääasiassa syksyllä ja samalla oletetaan, etteivät Helsingin säätiedot poikkea merkittävästi Vantaan säätiedoista.

Homeindeksin suuruutta muissa Suomen kaupungeissa on vertailtu laskemalla homeindeksi Helsingin, Jyväskylän ja Sodankylän vuoden 1979 säätiedoilla (LIITE 5). Näistä tarkastelutapauksista homeen kasvulle kriittisimmät olosuhteet saatiin Helsingin 1979 säätiedoilla.

Rakenteen sisäpuolen olosuhteille käytetään laskennassa sinimuotoista käyrää sekä lämpötilalle että suhteelliselle kosteudelle. Tämä kuvaa lämpötilan ja kosteuden vaihtelua vuodenaikojen mukaan. Suhteellinen kosteus vaihtelee vuoden aikana välillä 40–60 % ollen korkeimmillaan 16.8. Lämpötila vaihtelee vuoden aikana välillä 22–24 °C ollen korkeimmillaan 1.7. Sinimuotoinen käyrä asettaa sisäilmaan kosteuslisän, jonka suuruus on tammikuussa keskimäärin Helsingissä 5,2 g/m³ ja Sodankylässä 6,4 g/m³. Lähteen [4] mukaan kosteuslisän suuruus pientaloissa on talvella keskimäärin 2 g/m³.

7.2.2 Ilmansuunta ja kattokaltevuus

Laskennassa ei ole huomioitu auringon säteilyn lämmittävää ja kuivattavaa vaikutusta kattopintaan ja tuuletusväliin. Tämä otetaan laskennassa huomioon pinnan lämmönsiirtokertoimilla. Laskennassa käytetyt pintojen siirtokertoimet on esitetty liitteessä (LIITE 6). Laskentamalli kuvaa näin ollen jyrkkää pohjoispuolen kattolapetta, jolle ei tule suoraa auringon säteilyä. Pohjoispuolen kattolape on homehtumisen kannalta kriittisin, koska siellä auringon säteilyn lämmittävä vaikutus on vähäisintä ja siten suhteellinen kosteus on keskimääräisesti korkeampi kuin muilla kattolapteen suuntauksilla. Laskentamallissa kattolapteen kaltevuus on 45 °.

7.2.3 Laskentamallin rajaukset

Laskentamallissa ei ole huomioitu kosteuden ja lämmön siirtymistä höyrynsulun tai aluskatteen epätiiviestä kohdista rakenteen sisään tai rakenteen läpi. Eli laskentamalli olettaa, että sekä sisäpuolinen höyrynsulku että aluskate on täydellisen ilmatiivis. Kosteutta siirtyy rakenteen sisäpuolelta ulkopuolelle ainoastaan diffuusiolla.

Laskentamallissa ei ole myöskään huomioitu mahdollisen vapaan veden tai vesihöyryn jäätyminen vaikutusta rakennekerrosten rajapintoihin. Jos johonkin rajapintaan todellisuudessa jäätyy vettä, niin sillä on vaikutusta muun muassa rakennekerrosten vesihöyrynläpäisevyyteen.

Laskentamalliin ei ole mallinnettu rakenteen puurunkoa, joten sen hygroskooppista vaikutusta kosteuden sitoutumiseen ei ole laskennassa huomioitu.

7.2.4 Homemalli

Kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden tarkastelupiste sijaitsee lämmöneristeen ulkopinnassa aivan aluskatteen alapinnan lähellä (1,7 mm aluskatteen alapinnasta kun aluskatteen on oletettu olevan paksuudeltaan 1 mm). Homeindeksin laskennassa on käytetty laskennan aikajaksona yhtä tuntia (h). Materiaaliominaisuuksina on käytetty hyvin herkästi homehtuvan materiaalin kertoimia taulukon (Taulukko 6 sivulla 18) mukaan ja homeen kasvun taantumana on käytetty käsittelemättömän puun kerrointa 1 taulukon (Taulukko 7 sivulla 19) mukaan.

Homemallin suurin epävarmuustekijä liittyy homeen kasvun taantumanopeuteen, joka aiheuttaa sen, että pitkien taantumajaksojen kuvaaminen homemallilla voi johtaa virheelliseen tulokseen homeindeksin lopullisessa tasossa. Näin ollen homemallilla ei voida kuvata mahdollista useiden vuosien aikana kertyvää homekasvustoa.

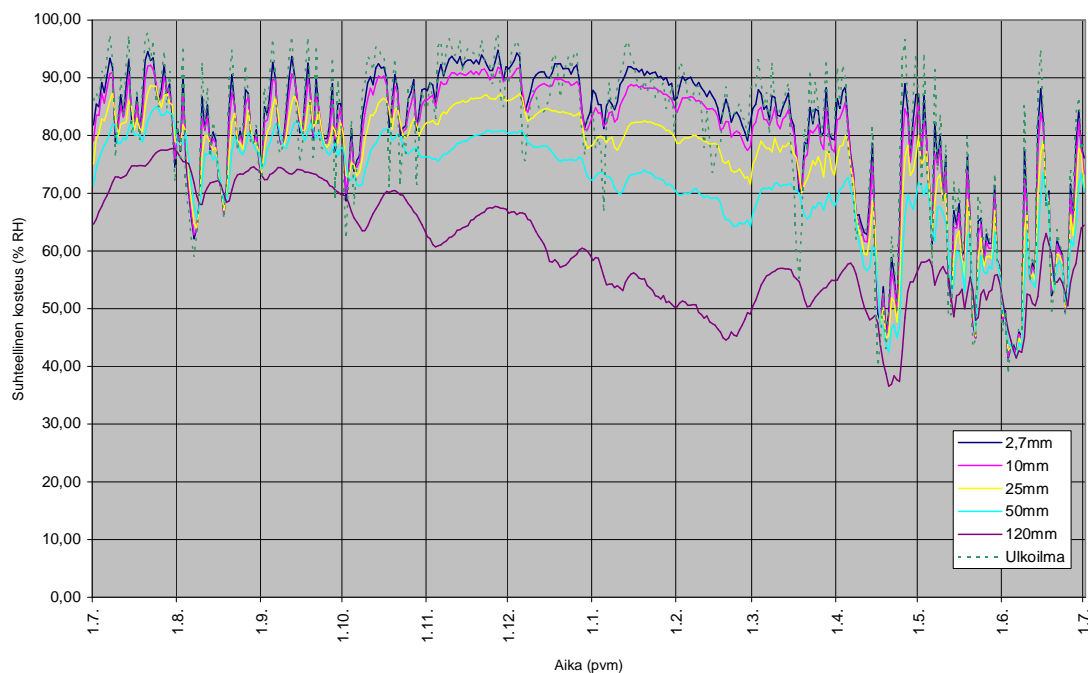
7.3 Laskentatapaukset

Rakennetta tarkastellaan erikseen kolmessa eri tapauksessa, jotta saadaan kattava kuva rakenteen käyttäytymisestä useissa eri olosuhteissa. Tarkastelutapaukset ovat

- **Tapaus 1: Tuulensuoja-aluskaterakenne.** Tämä tapaus kuvaa tuulensuoja-aluskaterakenteen perustapausta, joka on kuvan (Kuva 45) mukainen. Tässä tapauksessa tutkitaan rakenteen toimintaa silloin, kun rakenteeseen ei kohdistu ylimääräistä kosteusrasitusta.
- **Tapaus 2: Rakennekosteus.** Rakenne on muuten samanlainen kuin tapauksessa 1, mutta nyt rakenteen eristekerrokseen asetetaan alkukosteus suuruudeltaan 2 kg/m^2 . Tämä kuvaa rakentamisen aikana rakenteeseen päässyttä kosteutta tai vesivahingosta peräisin olevaa kosteutta. Tässä tapauksessa tutkitaan rakenteen kuivumiskykyä.
- **Tapaus 3: Vesihöyrynvastukseltaan muuttuva höyrinsulku.** Rakenne on muuten samanlainen kuin tapauksessa 1, mutta nyt rakenteen sisäpuolen höyrinsulkuna käytetään kalvoa, jonka vesihöyrynvastus muuttuu suhteellisen kosteuden mukaan. Laskennassa höyrinsulkukalvon ominaisuuksina käytetään Isover Vario Duplex –höyrinsulkukalvon ominaisuuksia.
- **Tapaus 4: Perinteinen rakenne.** Rakenne on muuten samanlainen kuin tapauksessa 1, mutta nyt rakenteessa ei ole lämmöneristeen päällä aluskatetta. Rakenne kuvaa perinteistä aluskatteen alapuolelta tuuletettua rakennetta, jossa ei ole lämmöneristeen päällä tuulensuojaa. Tämän tapauksen avulla voidaan vertailla tuulensuoja-aluskaterakennetta (tapaus 1) ja perinteistä rakennetta (tapaus 4).

7.4 Tulokset ja niiden analysointi

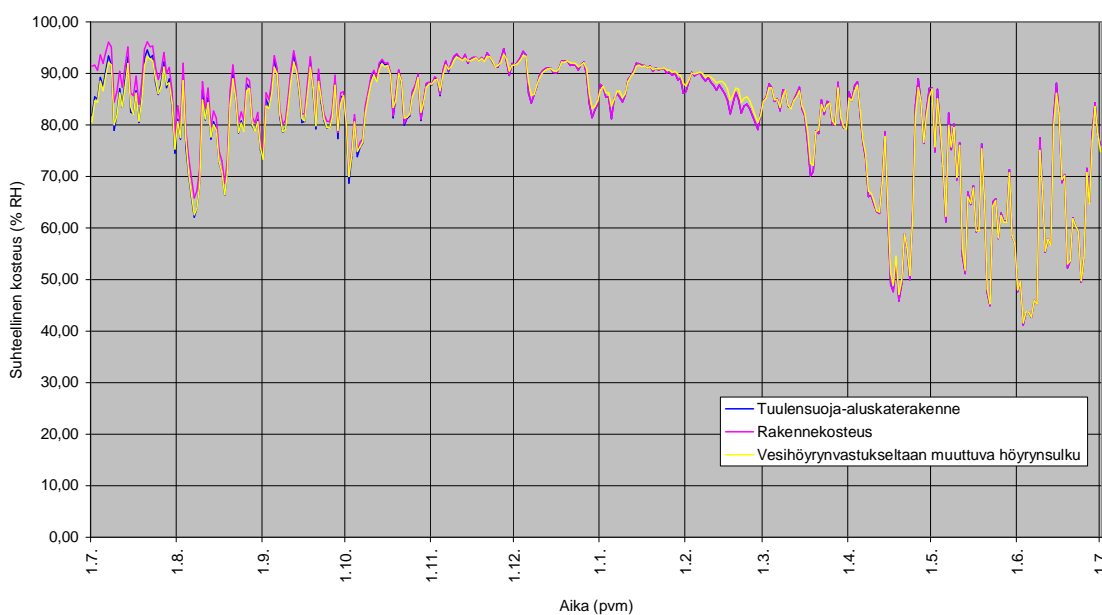
Tuulensuoja-aluskaterakenteen (tapaus 1) suhteellinen kosteus eri tarkastelupisteissä vuoden aikana on kuvan (Kuva 47) mukainen. Tarkastelupisteet on sijoitettu eri syvyyksille rakenteen ulkopinnasta. Kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös ulkoilman kosteuspitoisuus (vihreä katkoviiva).



Kuva 47: Tuulensuoja-aluskaterakenteen (tapaus 1) suhteellinen kosteus vuorokauden keskiarvoina vuoden aikana. Tarkastelupisteet sijaitsevat rakenteessa eri etäisyyksillä aluskatteen ulkopinnasta. Vihreä katkoviiva kuvaa ulkoilman suhteellista kosteutta.

Aivan aluskatteen alla (käyrä 2,7 mm) suhteellinen kosteus on lähellä ulkoilman suhteellista kosteutta. Aluskatteen alla suhteellinen kosteus on kuitenkin tasaisempi kuin ulkoilmassa. Kosteus tässä pisteessä on peräisin pääosin ulkoilman kosteudesta, koska sisäpuolen höyrinsulku estää tehokkaasti sisäpuolisen ilmankosteuden pääsyn rakenteen ulkopintaan. Suhteellinen kosteus rakenteessa alenee ja tasaantuu mentäessä syvemmälle rakenteen sisään. 120 mm syvyydellä (käyrä 120 mm) suhteellinen kosteus pysyy ulkopintaa huomattavasti alhaisempana ja tasaisempana. Suhteellinen kosteus ei missään vaiheessa vuoden aikana saavuta 100 %:a, mikä tarkoittaa, että kosteus ei tiivisty rakenteeseen.

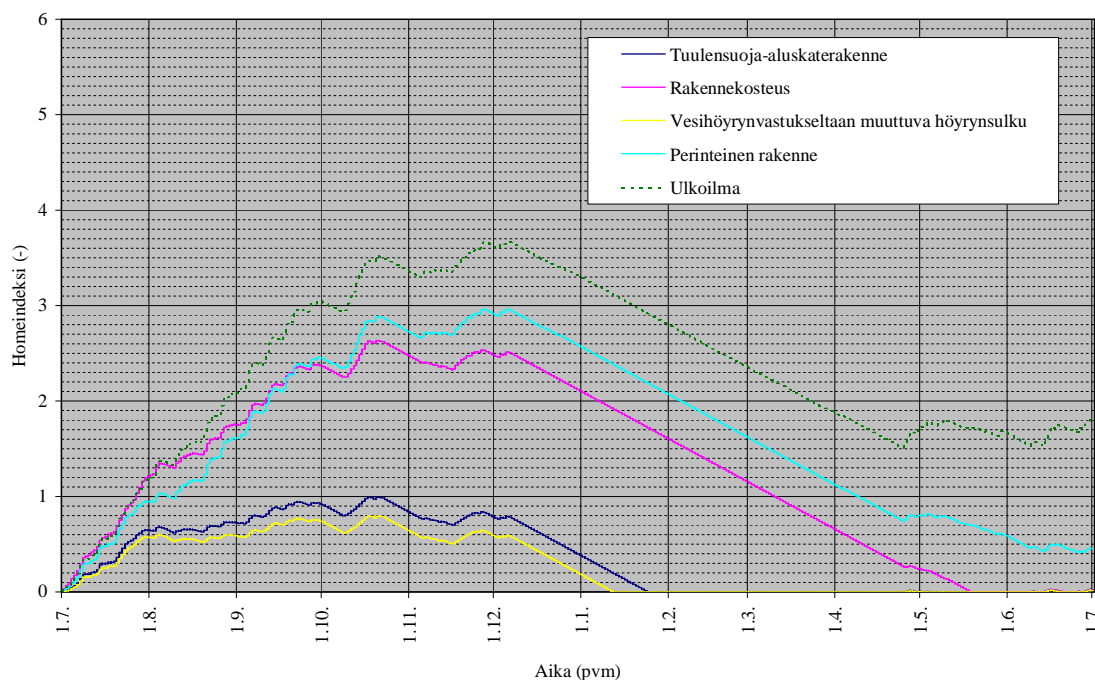
Kuvassa (Kuva 48) on esitetty rakenteen suhteellinen kosteus kolmessa eri laskentatapauksessa. Tarkastelupiste on kaikissa tapauksissa aluskatteen alapinnassa.



Kuva 48: Rakenteen suhteellinen kosteus kolmessa eri laskentatapauksessa vuorokauden keskiarvoina vuoden aikana aluskatteen alapinnassa. Rakennekosteuden tapauksessa (tapaus 2) lämmöneristekerrokseen asetettiin alkukosteus 2 kg/m^2 .

Kuvasta nähdään, että rakennekosteuden tapauksessa suhteellinen kosteus on laskennan ensimmäisinä viikkoina hieman muita tapauksia korkeampi, mutta tasaantuu nopeasti muiden tapauksien tasolle muutaman viikon kuluessa. Tämä tarkoittaa sitä, että ylimääräinen kosteus pystyy poistumaan tehokkaasti rakenteesta. Tapauksessa, jossa höyrinsulkuna on vesihöyrynvastukseltaan muuttuva kalvo, suhteellinen kosteus pysyy tuulensuoja-aluskaterakenteen perustapauksen (tapaus 1) kanssa samalla tasolla. Liitteessä (LIITE 7) on vertailtu tuulensuoja-aluskaterakenteen (tapaus 1) ja perinteisen rakenteen (tapaus 4) suhteellisen kosteuden arvoja. Lisäksi liitteessä (LIITE 7) on esitetty vertailun vuoksi ulkoilman suhteellinen kosteus.

Rakenteessa vallitsevien kosteus- ja lämpötilaolojen perusteella voidaan arvioida homeen kasvun riskiä rakenteessa. Homeen kasvun riskiä on arvioitu laskemalla rakenteelle homeindeksi (Homeindeksistä on kerrottu aiemmin tämän työn kappaleessa 3.3.). Kuvassa (Kuva 49) on esitetty homeindeksi eri laskentatapauksissa. Laskennassa on käytetty Helsingin säätietoja ja tarkastelupisteenä on aluskatteen alapinta.



Kuva 49: Homeindeksi eri laskentatapauksissa vuoden aikana. Tarkastelupiste sijaitsee kaikissa muissa tapauksissa aluskatteen alapinnassa paitsi ulkoilman tapauksessa. Tuulensuoja-aluskaterakenne (tapaus 1) kuvaa rakenteen perustapausta. Rakennekosteuden tapauksessa (tapaus 2) lämmöneristekerrokseen asetettiin alkukosteus 2 kg/m^2 . Vesihöyrynvastukseltaan muuttuva höyrynsulku (tapaus 3) kuvaa tapausta, jossa rakenteen sisäpuolella on höyrynsulku, jonka vesihöyrynvastus muuttuu kosteuspiitoisuuden mukaan (esim. Isover Vario Duplex). Perinteinen rakenne (tapaus 4) kuvaa aluskatteen alapuolelta tuuletettua rakennetta, jossa lämmöneristeen ulkopinnassa ei ole tuulensuojaa. Vihreä katkoviiva kuvaa ulkoilman olosuhteita.

Kuvasta nähdään, että kaikissa tapauksissa riski homeen kasvulle kasvaa heinäkuun alusta marras-joulukuuhun. Talven ja kevään aikana homeindeksi vähenee kaikissa tapauksissa ja putoaa kevään aikana nollian kaikissa muissa paitsi perinteisen rakenteen tapauksessa ja ulkoilmassa. Tuulensuoja-aluskaterakenteen perustapauksessa ja vesihöyrynvastukseltaan muuttuvan höyrynsulun tapauksessa riski homeen kasvulle on alhainen ja homeindeksin maksimi arvo jää vuoden aikana alle yhteen. Homeindeksin luokituksen (Taulukko 4) mukaan kasvu ei ehdi käynnistyä vuoden aikana eikä kasvu voi havaita mikroskooppisesti. Rakennekosteuden tapauksessa riski homeen kasvulle on jonkin verran suurempi. Homeindeksin luokituksen (Taulukko 4) mukaan kasvu on selvästi havaittavissa mikroskooppilla, mutta homeen kasvu ei saavuta silmin havaittavaa tasoa (homeindeksin arvo 3) vuoden aikana.

Perinteinen rakenne kuvaa aluskatteen alapuolelta tuuletettua rakennetta, jossa lämmöneristeen ulkopinnassa ei ole tuulensuojaa. Tässä tapauksessa riski homeen kasvulle on samaa luokkaa kuin rakennekosteuden tapauksessa. Kuvaan on merkitty vertailun vuoksi myös ulkoilmalle laskettu homeindeksi (vihreä katkoviiva). Joulukuusta huhtikuun loppuun homeindeksi taantuu, mutta lähtee taas toukokuussa hiljalleen kasva-

maan. Homeindeksi ei vähene talven ja kevään aikana noltaan, vaan pysyy homeindeksin arvon 1 yläpuolella.

7.5 Herkkyystarkastelu

Laskenta on tehty käyttäen rakennemallia, joka on kosteusteknisesti niin sanotusti ”varmalla puolella”. Laskentamallin epävarmoille tekijöille on tehty herkkyystarkastelua, joista osa on esitetty työn liitteissä (LIITE 5 ja LIITE 3). Herkkyystarkastelussa laskennassa käytettyjä muuttujia ja kertoimia on muutettu ja vaihdeltu. Näin on saatu käsitys muuttujan tai kertoimen vaikutuksesta lopputulokseen. Laskentaan valittiin ne kertoimet, jotka tuottivat rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta epäedullisimman tuloksen. Joidenkin muuttujien vaikutus lopputulokseen on itsestään selvä, mutta tarkastelussa on haluttu ottaa huomioon kaikki oleelliset muuttujat. Herkkyystarkastelussa tehtiin seuraavat huomiot:

- Helsingin säätiedot vuodelta 1979 ovat homeen kasvun kannalta suotuisimmat, kun vertailussa oli mukana Helsingin, Jyväskylän ja Sodankylän säätiedot vuodelta 1979 (LIITE 5).
 - Laskennassa käytettiin Helsingin säätietoja vuodelta 1979
- Vesikatteen ja tuuletusvälin mallintaminen on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta edullinen (LIITE 3).
 - Laskennassa ei mallinnettu vesikatetta eikä tuuletusväliä
- Auringon säteilyn vaikutus on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta edullinen. Tämä otetaan huomioon pinnan siirtokertoimella ”lyhytaaltainen absorptiokerroin”. (LIITE 8)
 - Laskennassa ei huomioitu auringon säteilyn vaikutusta, kun lyhytaaltaisen absorptiokertoimen arvo asetettiin nolaksi.
- Kattokaltevuudella ei ollut vaikutusta laskentatuloksiin, koska auringonsäteilyä ei laskennassa huomioitu.
 - Laskennassa käytettiin kattokaltevuutta 45°
- Ulkopinnan lämmönvastus on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta sitä edullisempi mitä suurempi pintavastus on (LIITE 9).
 - Laskennassa käytettiin pintavastuksen arvoa 0,0526 m²K/W
- Kattokaltevuudella ei ollut vaikutusta laskentatuloksiin, koska auringonsäteilyn lämmittävää vaikutusta ei laskennassa huomioitu.
- Pitkäaaltoisella säteilyn emissiokertoimella ei ollut vaikutusta laskentatuloksiin.
- Tuulesta riippuva ulkopinnan lämmönvastus on rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta edullinen (LIITE 9).

→ Laskennassa ei käytetty tuulesta riippuvaa ulkopinnan pintavastusta

7.6 Kommentit laskennallisesta tarkastelusta

Rakenteen tarkastelupiste sijaitsee aluskatteen ja lämmöneristeen rajapinnassa. Tähän tarkastelupisteeseen kosteutta kulkeutuu lähinnä ulkoilmasta, jolloin tämän pisteen olosuhteet ovat hyvin riippuvaisia ulkoilman olosuhteista. Tästä johtuen myös homeen kasvun riski on hyvin riippuvainen ulkoilman olosuhteista. Niinpä tarkastelupisteen homeindeksi ei kuvaa parhaalla mahdollisella tavalla rakenteen kosteusteknistä toimintaa, vaan se kuvaa paremminkin sitä, kuinka otolliset olosuhteet ulkoilmassa on homeen kasvulle. Toisaalta kuvasta (Kuva 49) voidaan huomata selvästi myös se, että olosuhteet aluskatteen alla ovat homeen kasvulle selvästi vähemmän suotuisat kuin ulkoilmassa. Homeindeksin pienempi arvo aluskatteen alla johtunee siitä, että aluskatteen alla suhteellinen kosteus ja lämpötila ovat tasaisempia. Ulkoilman hetkellisesti korkea kosteuspitoisuus kasvattaa homeindeksiä nopeammin kuin tasainen kosteuspitoisuus aluskatteen alla, mutta homeindeksin taantumisen nopeus on samansuuruinen sekä ulkoilmassa että aluskatteen alla huolimatta ulkoilman hetkellisesti alhaisemmasta suhteellisesta kosteudesta.

Homeindeksillä kuvattu homeen kasvun riski on tässä laskennallisessa tarkastelussa liioiteltu ja siten sen kuvaama homeen kasvun riski on niin sanotusti ”varmalla puolella”. Tämä tulee hyvin esille ulkoilmalle lasketusta homeindeksistä (Kuva 49), jonka mukaan ulkoilman olosuhteet ovat otolliset homeen kasvulle kesän ja syksyn aikana. Lasketun homeindeksin mukaan homeen kasvu ehtii kehittyä vuodessa selvästi silmin havaittavalle tasolle peittäen 10–50% tarkasteltavasta pinnasta.

Toinen asia, joka tuo laskentaan lisävarmuutta, on laskentaohjelmassa valitut muutujat ja kertoimet. Valituilla kertoimilla on suoraa vaikutusta homeindeksiin, kuten herkkyystarkastelussa näytetään. Laskennassa käytetyt kertoimet on valittu herkkyystarkastelun avulla, siten että laskennassa on käytetty lopputuloksen kannalta epäedullisinta vaihtoehtoa.

Toisaalta laskennassa tuleekin olla varmuutta, sillä laskennassa on myös epävarmuutta tuovia tekijöitä. Laskennassa ei oteta huomioon sisäilman vuotoja epätiivisiin ilmansulun raoista. Rakenteen laskennassa kuvattu malli edustaa ilmatiiveydeltään täydellistä rakennetta. Ilmavuotojen huomiotta jättämistä voidaan perustella ensinnäkin sillä, että tuulensuoja-aluskaterakenteen on todettu olevan perinteistä rakennetta huomattavasti ilmatiiviimpi kahden ilmatiiviin rakennekerroksen ansiosta (aluskate ja ilman- / höyrynsulku) [21]. Lisäksi rakennekosteuden laskentatapaus (tapaus 2) näyttää, että rakenteen sisään päässyt ylimääräinen kosteus voi poistua helposti aluskatteen läpi. Rakennekosteuden laskentatapauksen voi siten ajatella mallintavan myös osittain sitä tapausta, että rakenteen sisäpuolinen ilmansulku on epätiivis ja rakenteen sisäpuolelta pääsee kosteutta kulkeutumaan rakenteen sisään ilmavuotojen mukana.

Toinen epävarmuutta tuova tekijä on se, että homemallilla ei voi ottaa huomioon vuodesta toiseen jatkuvaa homeen hidasta kertymistä rakenteeseen. Homeen kasvu rakenteessa pysyy kuitenkin todennäköisesti alhaisena, koska rakenteen homeindeksi ei saavuta arvoa 1, joka kuvaa homeen kasvun alkamista, jolloin homeitiöt alkavat itää.

Rakennekosteuden tapauksessa homeindeksin suuruus (Kuva 49) riippuu siitä miten suuri alkukosteus rakenteeseen asetetaan. On selvää, että homeindeksi on suuri silloin kun alkukosteus on suuri, jolloin rakenne pysyy kosteana pidemmän aikaa kuin siinä tapauksessa, että alkukosteus olisi pieni. Tässä laskennallisessa tarkastelussa rakennekosteuden tapauksen tarkoitus onkin lähinnä näyttää, että kosteus pääsee poistumaan helposti rakenteesta. Tämä näytetään kuvassa (Kuva 48), jossa esitetään aluskatteen alapinnan suhteellinen kosteus eri tapauksissa.

Vesihöyrynvastukseltaan muuttuvan höyrynsulun tapauksessa homeindeksi on aavistuksen pienempi kuin tuulensuoja-aluskaterakenteen tapauksessa (Kuva 49). Tämä johtunee siitä, että ulkoilman kosteus pääsee siirtymään rakenteen sisään vesihöyrynläpäisevyydeltään muuttuvan höyrynsulkukalvon läpi diffuusiolla paremmin kuin perinteisen höyrynsulkukalvon (PE-kalvo).

Laskennassa vesihöyryvoimempi höyrynsulkukalvo tuottaa alhaisemman homeindeksin kuin tiivis höyrynsulkukalvo (PE-kalvo). Olisi kuitenkin virheellistä olettaa, että höyrynsulun puuttuminen kokonaan tuottaisi vieläkin alhaisemman homeindeksin arvon. Vertailun vuoksi laskettiin myös se, miten homeindeksiin vaikuttaa höyrynsulun puuttuminen rakenteesta kokonaan. Tämän laskennan tulokset on esitetty liitteessä (LIITE 10). Kyseinen laskentatapaus on muuten samanlainen kuin laskentatapaus 1 sillä erotuksella, että laskennassa käytettiin poikkeuksellisesti ulkoilman säätietoina Espoon säätietoja. Säätiedot saatiin suoraan laskentaohjelmasta. Vertailulaskelma näyttää selvästi sen, että höyrynsulun puuttuminen on rakenteelle epädullista. Rakenteen, josta höyrynsulku puuttuu, homeindeksi on korkeampi, kuin rakenteen, jossa on sisäpuolella höyrynsulkuna PE-kalvo.

7.7 Yhteenveto laskennallisesta tarkastelusta

Rakenteen kosteusteknisen toiminnan laskennallinen tarkastelu tehtiin WUFI Pro laskentaohjelman versiolla 4.2. Kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden perusteella laskettiin rakenteelle homeen kasvun riskiä kuvaava homeindeksi aluskatteen alapinnassa.

Laskentatulosten mukaan olosuhteet aluskatteen alapinnassa ovat ajoittain homeen kasvulle otolliset. Suhteellinen kosteus aluskatteen alapinnassa on välillä selvästi yli 80 % erityisesti marraskuun ja helmikuun välisenä aikana. Samaan aikaan kuitenkin lämpötila on alhainen, jolloin olosuhteet eivät ole homeen kasvulle otolliset korkeasta suhteellisesta kosteudesta huolimatta. Homeindeksi kasvaakin pääasiassa kesän ja syksyn aikana ja vähenee talven ja kevään aikana. Tuulensuoja-aluskaterakenteelle homeen kasvun riski on alhainen koko vuoden. Vesihöyrynvastukseltaan muuttuvan höyrynsulun (esim. Isover Vario Duplex) käyttö ei laskennan mukaan lisää homeen kasvun ris-

kiä, vaan itse asiassa homeindeksi on tällöin laskennallisesti aavistuksen pienempi. Tämä johtuu siitä, että rakenne pääsee kuivumaan kesäaikana myös sisäänpäin. Vesivuotoa rakenteen sisään tai rakentamisen aikana rakenteen sisään päässyttä kosteutta mallinnettiin yhdessä laskentatapauksessa. Siinä todettiin, että rakenteen sisään päässyt ylimääräinen kosteus voi poistua rakenteesta helposti aluskatteen läpi. Ylimääräinen kosteus kasvattaa homeen kasvun riskiä, jolloin oleellista on se, että rakenne pystyy kuivumaan mahdollisimman nopeasti.

Laskennassa käytetyt muuttujat valittiin siten, että saadut tulokset ovat niin sanotusti varmallalla puolella. Tämän voi havaita selvästi esimerkiksi ulkoilmalle lasketusta homeindeksistä, jonka mukaan home kasvaa ulkoilmassa vuoden aikana selvästi silmin havaittavalle tasolle. Kosteus aluskatteen alapinnassa on peräisin ulkoilmasta, joten homeen kasvun riski aluskatteen alapinnassa on hyvin riippuvainen ulkoilman olosuhteista. Toisaalta laskennassa on myös epävarmuutta tuovia tekijöitä, kuten rakenteen sisäpuolelta tulevien ilmapuotojen huomiotta jättäminen. Ja siten tulosten tuleekin olla varmallalla puolella.

Laskennallisen tarkastelun perusteella rakenteeseen ei keräänny kosteutta ja rakenteeseen päässyt ylimääräinen kosteus pääsee poistumaan helposti rakenteesta. Lisäksi rakenteen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet ovat sellaiset, ettei rakenteeseen pääse kehittymään haitallista homeenkasvua. Näin ollen laskennallisen tarkastelun perusteella rakenne toimii kosteusteknisesti hyvin.

8 YHTEENVETO

8.1 Tutkimuksen kulku ja tulokset

Tässä diplomityössä tutkittiin Suomessa uudentyyppisen yläpohjarakenteen, tuulensuoja-aluskaterakenteen, soveltuvuutta Suomen ilmasto-olosuhteisiin ja Suomessa rakennettaville tyypillisimmille kattorakenteille. Työssä pyrittiin myös löytämään rakenteen käyttöä mahdollisesti rajoittavia tekijöitä. Tietoa rakenteen soveltuvuudesta etsittiin kirjallisuusselvityksen, aluskatteen vesihöyrynläpäisevyydestin ja rakennusfysikaalisen laskennan avulla.

Tuulensuoja-aluskaterakenne on yläpohjarakenne, jossa aluskatteen ja lämmöneristeen välissä ei ole tuuletustilaa tai -väliä. Rakenteessa käytettävä aluskatemateriaali on sadeveden- ja tuulenpitävä sekä hyvin vesihöyryä läpäisevä. Vinossa yläpohjassa aluskate voidaan asentaa suoraan lämmöneristeen päälle ja ullakkotilallisessa yläpohjassa ullakkotila voidaan sulkea aluskatteella tuulettumattomaksi. Rakenteeseen päässyt ylimääräinen kosteus pääsee kulkeutumaan diffuusiolla aluskatteen läpi. Sisäpuolisen kosteuden pääsy rakenteen sisään estetään sisäpuolisella höyry- ja ilmansululla, kuten kaikissa muissakin yläpohjarakenteissa. Aluskatteen muodostama toinen ilmansulkukerros rakenteessa parantaa selvästi rakenteen ilmanpitävyyttä. Parempi ilmanpitävyys taas varmistaa rakenteen hyvän kosteusteknisen toiminnan ja parantaa rakenteen lämpöteknistä toimivuutta. Lisäksi aluskate suojaa lämmöneristettä tuulen aiheuttamilta konvektiovirtauksilta sekä sisään puhaltavalta lumelta ja vedeltä.

Kirjallisuusselvityksessä tutkittiin tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttöä Saksassa, Sveitsissä, Iso-Britanniassa, Tanskassa, Norjassa ja Ruotsissa. Selvityksen perusteella rakenne on hyvin tunnettu kaikissa tutkituissa maissa. Näistä maista rakenne on yleisesti käytössä Saksassa ja Sveitsissä. Tanskassa ja Norjassa rakenne ei ole niin yleinen, mutta on käytössä jossain laajuudessa, kun taas Isossa-Britanniassa ja Ruotsissa rakenne ei ole vielä yleisesti käytössä. Kaikissa tutkituissa maissa rakenteen käyttö on mahdollista eikä näiden maiden rakennusmääräykset estä rakenteen käyttöä. Selkeimmät ohjeet rakenteen toteuttamiseksi löytyi Isosta-Britanniasta, Norjasta ja Tanskasta. Näissä maissa rakenteesta on julkaistu ohjekortti, jossa tuulensuoja-aluskaterakenne esitetään vaihtoehtoisena yläpohjarakenteena perinteiselle aluskatteen alapuolelta tuuletetulle rakenteelle. Ohjekortin on julkaissut Isossa-Britanniassa BRE:n tutkimuslaitos, Norjassa SINTEF:n tutkimuslaitos ja Tanskassa BYG-ERFA.

Kun verrataan rakenteen käyttöä perinteiseen rakenteeseen, jossa on aluskatteen alapuolella tuuletettu tila, niin tutkimuksessa löydettiin kaksi tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttöä rajoittavaa tapausta. Norjassa tuulensuoja-aluskaterakenteen

kattokaltevuudeksi suositellaan vähintään 1:3 (18°), kun perinteisen aluskatteen alapuolelta tuuletetun rakenteen kattokaltevuudeksi suositellaan vähintään $\sim 1:4$ (15°). [59] Toinen rajoittava tekijä löytyi Isosta-Britanniasta. Ison-Britannian standardissa BS5250 sanotaan, että rakennettaessa vino yläpohjarakenne, jossa on tuulensuoja-aluskate, tulee rakenteen sisäpuolinen ilmansulku tehdä erityisen tiiviiksi [42]. Perinteisellä aluskatteen alapuolelta tuuletetulla katolla samanlaista vaatimusta sisäpuolen ilmasululle ei ole.

Tuulensuoja-aluskaterakenteessa rakenteen sisään päässyt kosteus pääsee poistumaan rakenteesta diffuusiolla aluskatteen läpi sitä paremmin mitä suurempi on aluskatteen vesihöyrynläpäisevyys. Tuulensuoja-aluskaterakenteessa aluskatteen vesihöyrynläpäisevyydelle käytetään eri maissa eri arvoja aluskatteen suurimmaksi sallituksi s_d -arvoksi. Ruotsissa aluskatteen s_d -arvon tulee olla enintään 0,2 m [50], Norjassa 0,5 m [23] ja Tanskassa 0,55 m [29]. Isossa-Britanniassa vaatimus on tiukin ja siellä aluskatteen s_d -arvon tulee tuulensuoja-aluskaterakenteessa olla enintään 0,05 m [41]. Pohjoismaissa käytetyt aluskatteen s_d -arvon raja-arvot ovat melko korkeat, kun niitä verrataan tällä hetkellä markkinoilla oleviin diffuusioavoimiin aluskatteisiin, joiden s_d -arvot ovat luokkaa 0,02–0,03 m.

Tuulensuoja-aluskaterakennetta on tutkittu useassa eri maassa monen eri tutkimuslaitoksen toimesta. Tämän työn kannalta oleellimmat tutkimukset on tehty Pohjoismaissa, joissa ilmasto-olosuhteet ovat lähimpänä Suomen ilmasto-olosuhteita. Suomessa VTT on tutkinut rakennetta täysimittaisessa kenttäkokeessa vuosina 1998–2001. Tutkimuksessa tutkittiin rakenteen kosteus- ja lämpötekniistä toimintaa altistamalla kattorakenne sisäpuoliselle kosteusrasitukselle. Ruotsissa rakennetta on tutkittu valtion teknisen tutkimuslaitoksen SP:n toimesta sekä kenttätutkimuksessa todellisessa kohteessa että laboratoriotutkimuksessa. Kenttätutkimuksessa seurattiin kahden pientalon kattorakenteen kuntoa vuosina 2000 ja 2006, kun kattorakenteen ilman-/höyrynsulkua ei ollut tehty tiiviisti. Laboratoriotutkimuksessa koerakenteet altistettiin monenlaiselle kosteusrasitukselle ja tutkimuksessa seurattiin rakenteen sisäistä kosteuspitoisuutta ja rakenteen kuivumiskykyä. Lundin teknillinen korkeakoulu tutki rakennetta todellisessa kerrostalokohteessa seuraamalla katon kosteustekniistä toimintaa 2,5 vuoden ajan. Kaikissa tutkimuksissa rakenteen todettiin toimivan kosteusteknisesti hyvin eikä aluskatteen todettu muodostavan estettä rakenteen kuivumiselle [29], [53], [54], [55]. Myös muissa kuin Pohjoismaisissa tutkimuksissa rakenteen on todettu toimivan kosteusteknisesti hyvin [39].

Verrattaessa tuulensuoja-aluskaterakenteen kosteustekniistä toimintaa perinteiseen aluskatteen alapuolelta tuuletettuun rakenteeseen on tutkimuksissa saatu hieman erilaisia tuloksia. VTT:n tekemässä tutkimuksessa todettiin rakenteen kuivumiskyvyn olevan parempi kuin perinteisen rakenteen [21]. Ruotsalaisen SP:n tekemässä tutkimuksessa rakenteen kosteuspitoisuus oli samansuuruinen perinteisen rakenteen kanssa eikä merkittäviä eroja näiden välillä ollut [54]. Pääsääntöisesti molemmissa tutkimuksissa päädyttiin kuitenkin samaan johtopäätökseen siitä, että tuulensuoja-aluskaterakenteen kos-

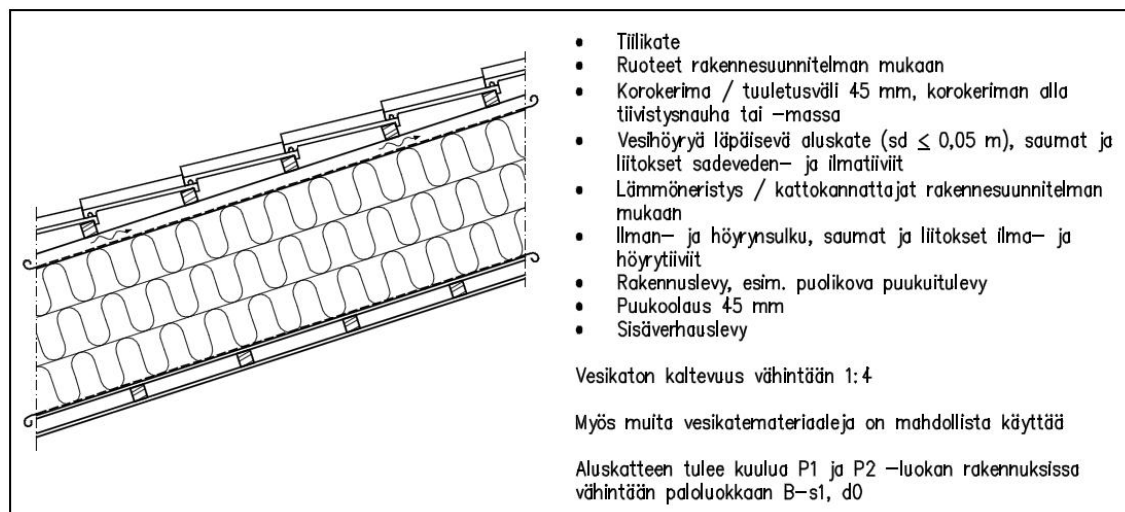
teustekninen toiminta on ainakin yhtä hyvä kuin perinteisellä aluskatteen alapuolelta tuuletetulla rakenteella.

Tässä tutkimuksessa aluskatteelle tehtiin vesihöyrynläpäisevyyskoe sekä viileissä (+3,7 °C) että kylmissä olosuhteissa (-10,3 °C). Aluskatteen s_d -arvoksi saatiin kokeessa +3,7 °C lämpötilassa 0,03 m ja -10,3 °C lämpötilassa 0,04 m. Kun otetaan huomioon, että aluskatteen s_d -arvo +20 °C lämpötilassa on 0,03 m, niin aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden ei todettu muuttuvan merkittävästi lämpötilan mukaan. Kokeen kokonaisvirhe oli kuitenkin suhteellisen suuri, joten kokeen tulokset ovat pääasiassa suuntaa antavia.

Rakenteen kosteusteknisen toiminnan laskennallinen tarkastelu tehtiin WUFI Pro laskentaohjelman versiolla 4.2. Kosteus- ja lämpötilaolosuhteiden perusteella laskettiin rakenteelle homeen kasvun riskiä kuvaava homeindeksi aluskatteen alapinnassa. Homeindeksille saatiin laskennassa maksimiarvoksi 1. Homeen kasvun riski on tällöin alhainen, joten laskennallisen tarkastelun perusteella rakenne toimii kosteusteknisesti hyvin.

8.2 Suositukset tuulensuoja-aluskaterakenteen käytölle

Tämän työn perusteella suositeltava rakenne on esitetty kuvassa (Kuva 50). Kuvassa on vesikatemateriaalina tiilikate, mutta tuulensuoja-aluskaterakenteen käyttö ei ole riippuvainen käytetystä vesikatemateriaalista. Rakennetta voidaan käyttää myös muiden katemateriaalien, kuten peltikatteiden tai muiden katteiden yhteydessä. Katteen alusrakenne (ruoteet, harvalaudoitukset tms.) suunnitellaan aina vesikatemateriaalin mukaan.



Kuva 50: Suositus tuulensuoja-aluskaterakenteen rakennetyypiksi

Riippumatta siitä mitä katemateriaalia käytetään, niin eräs olennainen vaatimus rakenteen hyvälle kosteustekniselle toiminnalle on, että aluskatteen yläpuolella, aluskatteen ja vesikatteen välissä, on hyvin tuulettuva tuuletusväli. Rakenteen sisään mahdollisesti päässyt kosteus voi siirtyä aluskatteen läpi diffuusiolla tuuletusväliin, josta se poistuu

tuuletusilman mukana ulkoilmaan. Tuuletusvälin tuulettavuuteen vaikuttaa pääasiassa kattolapteen pituus, katon kaltevuus, katemateriaali sekä tuuletusvälin esteettömyys. Tiilikatteilla tuuletus tapahtuu sekä tuuletusaukkojen kautta että osin myös kattotiilien raoista ja kattotiilien läpi, joten tiilikatoilla tuuletusvälin toiminta on helpoiten varmistettavissa. Peltikatteella tuuletus tapahtuu ainoastaan tuuletusaukkojen kautta. Lisäksi peltikatteilla tuulettavuuteen vaikuttaa se onko kate aaltomaista poimupeltiä vai sileää rivipeltiä. Poimupellin poimun yläosan kohdalla tuuletusväli on suurempi kuin poimun alaosan kohdalla. Tuulensuoja-aluskaterakenteessa tuuletusvälin hyvän tuulettavuuden varmistamiseksi suositellaan tuuletusaukkojen sijoittamista sekä räystäälle että harjalle. Lisäksi tuuletusaukot voidaan sijoittaa myös rakennuksen päätyihin vesikatteen alle. Katon harjalla tämä tarkoittaa käytännössä harjatuuletuksen järjestämistä tuuletusputkien avulla tai käyttäen harjalla muuta erityisrakennetta.

Aluskatteen ja vesikatteen välinen tuuletusväli tulee olla korkeudeltaan riittävä, jotta varmistetaan tuuletusvälin hyvä tuulettavuus. Toisaalta tuuletusväli ei saa olla liian korkea, jolloin muun muassa tuiskulumi, roskat ja sade voivat päästä tuuletusväliin. Tuuletusvälin korkeudeksi suositellaan Isossa-Britanniassa vähintään 25 mm:ä, mutta yleensä olisi hyvä käyttää 50 mm:ä. Tanskassa tiilikatteen yhteydessä tuuletusvälin korkeudeksi suositellaan vähintään 22 mm:ä. Norjassa tuuletusvälin korkeus on riippuvainen katon kaltevuudesta ja kattolapteen pituudesta. Yleensä 50 mm on Norjassa riittävä korkeus, mutta jos kattolapteen pituus on enemmän kuin 7,5 m, niin tuuletusvälin tulee olla korkeampi. Tuuletusvälin korkeudeksi suositellaan tämän työn perusteella Suomessa käytettäväksi vähintään 45 mm:ä. On kuitenkin suositeltavaa käyttää korkeampaa tuuletusväliä esimerkiksi 75 mm:ä tai 100 mm:ä, mikäli katemateriaalina on peltikate (erityisesti rivipeltikate) tai muu tiivis katemateriaali ja samaan aikaan kattolape on pitkä (>7,5m) ja/tai kattokaltevuus on suhteellisen loiva (1:4...1:3). Tuuletusvälin korkeuden tulisi kuitenkin olla enintään 100 mm. Tämä suositus tuuletusvälin korkeudeksi vastaa suunnilleen Norjan teknillisen tutkimuskeskuksen Sintefin antamaa suositusta.

Rakenteen hyvä kosteustekninen toiminta varmistetaan sadevedentiiviillä ja mahdollisimman ilmatiiviillä aluskatteella sekä rakenteen sisäpuolen ilma- ja vesihöyrytiiviillä kerroksella. Tällä hetkellä kaikissa nykyajan kattorakenteissa edellytetään rakenteelta hyvää sisäpuolista ilmatiiveyttä. Sitä voidaan kuitenkin pitää erityisen tärkeänä tuulensuoja-aluskaterakenteessa, koska kyseessä on Suomessa uudentyypinen rakenne ja on hyvin tiedossa, että sen avulla voidaan varmistaa rakenteen hyvä kosteustekninen toiminta. Lisäksi hyvä ilmatiiveys parantaa rakenteen lämpötekniistä toimivuutta, mikä on eräs rakenteen merkittävimmistä hyödyistä. Sadeveden- ja ilmatiiveyden varmistamiseksi voidaan käyttää erilaisia tiivistystarvikkeita.

Aluskatteena tulee käyttää tuotetta, jonka ominaisuudet on todennettu luotettavien testien. Aluskatteen olennaiset vaatimukset on esitetty Kattoliiton aluskateluokituksessa. Tuulensuoja-aluskaterakenteessa aluskatteen tärkeimmät ominaisuudet ovat sadeveden ja tuulenpitävyys sekä suuri vesihöyrynläpäisevyys. Tuulensuoja-aluskaterakenne toimii kosteusteknisesti sitä paremmin mitä suurempi on aluskatteen vesihöyrynläpäisevyys.

Aluskatteen vesihöyrynläpäisevyyden raja-arvoksi suositellaan tämän työn perusteella Suomessa käytettäväksi s_d -arvoa 0,05 m. Suositus ei ole erityisen tiukka, kun otetaan huomioon nykyisin markkinoilla olevien tuotteiden suuri vesihöyrynläpäisevyys (s_d -arvo on luokkaa 0,02–0,03 m). Muista aluskatteen materiaaliominaisuuksista on lisäksi otettava erityisesti huomioon se, että aluskatteella ei ole niin sanottua telттаefektiä. Tällä tarkoitetaan sitä, että vesi ei saa päästä aluskatteen läpi, kun aluskate on asennettu suoraan lämmöneristeen tai muun alustan päälle. Telттаefektillä viitataan hyvin tunnettuun ilmiöön, jossa kosketus telttakankaan sisäpintaan sateen aikana johtaa veden tunkeutumiseen kankaan läpi. Aluskatteen ominaisuuksista on vielä huomioitava se, että aluskate on voitava asentaa sadeveden- ja ilmatiiviisti. Tähän vaikuttaa muun muassa aluskatteen liimattavat saumat ja saatavilla olevat tiivistystarvikkeet, kuten läpivientikappaleet sekä tiivistysteipit, -liimat ja massat.

Aluskatteen tiiviiseen asentamiseen on oltava riittävän tarkat ohjeet, joissa esitetään aluskatteen tiivis asentaminen kaikissa perustapauksissa sekä aluskatteen kanssa käytettävät tiivistystarvikkeet. Luonnollista olisi, että nämä ohjeet toimittaisi aluskatteen toimittaja, joka parhaiten tietää mitkä tiivistystuotteet soveltuvat käytettäväksi yhdessä aluskatteen kanssa. Yksityiskohtaiset ohjeet tulee olla ainakin katon reunojen ja erilaisen katon liittymien kohdalta, missä katto liittyy seinään tai toiseen kattolappeeseen. Lisäksi ohjeet tulee olla sekä suurien että pienien läpivientien tekemiseen.

Rakennetta suositellaan käytettäväksi pääasiassa jyrkillä katoilla. Katon suositeltava vähimmäiskaltevuus määräytyy Suomessa yleensä pelkästään käytetyn vesikatemateriaalin mukaan. Suomessa kattojen, joissa on perinteisesti käytetty vapaasti asennettavaa aluskatetta, vähimmäiskaltevuudet ovat yleensä luokkaa 1:5–1:4. Norjassa tuulensuoja-aluskaterakenteen vähimmäiskattokaltevuus on 1:3 ja Saksassa 1:4. On selvää, että mitä loivemmaksi katon kaltevuus menee, niin sitä tärkeämmäksi tulee aluskatteen sadevedenpitävyys. Norjassa ja Saksassa epäjatkuvalla katteella katetun katon vähimmäiskaltevuutta ei määritä pelkästään vesikatemateriaali, vaan vähimmäiskaltevuuteen vaikuttaa myös vesikatteen alapuolisen rakenteen sadevedentiiveys. Esimerkiksi, jos rakenteen sadevedentiiveys varmistetaan bitumikermillä, niin silloin voidaan sallia loivempi kattokaltevuus kuin siinä tapauksessa, että sadevedentiiveys on aluskatteen varassa. Suomessa tätä ei nykyisissä ohjeissa huomioida.

Tuulensuoja-aluskaterakenteen vähimmäiskaltevuudeksi suositellaan tämän työn perusteella Suomessa käytettäväksi kaltevuutta 1:4. Suositus vähimmäiskaltevuudeksi (1:4) on samaa luokkaa kuin nykyinen vaatimustaso yleisimmillä kattorakenteilla, joissa käytetään aluskatetta. Vähimmäiskaltevuuden lisäksi asetetaan tämän työn perusteella rakenteen käytölle seuraavat vaatimukset ja suositukset liittyen katon kaltevuuteen: Kattokaltevuuden ollessa 1:4...1:3 tulee aluskatteen olla hyvin sadevedentiivis. Tämä edellyttää seuraavia toimenpiteitä aluskatteen asennuksessa:

- Aluskatteen tulee olla sellainen, jossa on teippi- / liimasauma tai aluskatteen saumat tulee erikseen teipata siihen soveltuvalla erikoisteipillä.

- Kaikki katon läpiviennit sekä muut yksityiskohdat tulee tiivistää sadevedenpitävästi käyttäen apuna tarvittavia tiivistystarvikkeita, kuten läpivientikappaleita, tiivistysteippejä, -liimoja tai massoja
- Korokerimojen naulauksesta aluskatteeseen tulevat reiät tiivistetään korokerimojen alle asennettavalla tiivistysnauhalla tai -massalla.

Katon kaltevuuden ollessa jyrkempi kuin 1:3 toteutuu riittävä sadevedentiiveys luonnollisesti helpommin kuin loivemmillä katoilla. Näin ollen katon kaltevuuden ollessa enemmän kuin 1:3 ei aluskatteen asennukselta vaadita edellä mainittuja toimenpiteitä sadevedentiiveyden varmistamiseksi. On kuitenkin suositeltavaa, että aluskate asennetaan myös jyrkemmillä katoilla (kaltevuus > 1:3) ilmatiiviisti, koska ilmatiivis aluskate vähentää rakenteen läpi meneviä vuotoilmavirtauksia ja siten pienentää rakenteen lämpöhäviöitä. Näin ollen edellä mainitut toimenpiteet liittyen aluskatteen sadevedentiiveyteen asentamiseen ovat suositeltavia toimenpiteitä, kun kattokaltevuus on enemmän kuin 1:3, mutta vaadittavia toimenpiteitä, kun kattokaltevuus on 1:4...1:3.

Tässä kappaleessa esitetyt suositukset rakenteen käytölle koskevat pääasiassa vinoa yläpohjarakennetta. Yläpohjarakenteen kosteus- ja lämpötekniinen toiminta ei ole vinossa yläpohjassa täysin samanlainen kuin ullakkotilallisessa yläpohjassa. Ja vaikka kosteusteknisessä toiminnassa on paljon samankaltaisuuksia, niin rakenteelle annetut suositukset on tehty erityisesti vinolle yläpohjalle.

8.3 Keskustelu ja jatkokehitystarve

Jatkokehitystarpeena esitetään, että myös Suomessa katon vähimmäiskaltevuuteen tulisi asettaa lisävaatimus, jossa otetaan huomioon vesikatemateriaalin lisäksi epäjatkuvan vesikatteen alapuolisen sadevedentiiveyden toteutustapa. Esimerkiksi jos sadevedentiiveys toteutetaan bitumikermillä, niin vaatimus vähimmäiskaltevuudeksi voisi olla pienin (esimerkiksi 1:10). Jos sadevedentiiveys toteutetaan aluskatteella, jonka saumat ja läpiviennit on tiivistetty tarpeellisin tarvikkein, niin katon vähimmäiskaltevuus voisi olla hieman suurempi (esimerkiksi 1:4). Jos taas aluskatteen saumojen ja läpivientien tiiveydelle ei ole asetettu erityisvaatimuksia, niin katon vähimmäiskaltevuuden tulisi olla suurin (esimerkiksi 1:3 tai 1:2,5). Viimeksi mainitussa tapauksessa riittäisi, että aluskatteen saumat voidaan tehdä limittämällä ja läpivientien kohdalla aluskate muotoillaan ohjaamaan vesikatteen alle päässyt sadevesi pois.

Toisaalta tuulensuoja-aluskaterakenne tulisi aina toteuttaa siten, että aluskate on asennettu ilma- ja sadevedentiiviisti. Tämä tarkoittaisi sitä, että tuulensuoja-aluskaterakennetta ei voi toteuttaa ilman tarpeellisia tiivistystarvikkeita. Tällöin aluskatteen asentaminen ilman tarpeellisia tiivistystarvikkeita olisi mahdollista vain perinteisessä kattorakenteessa, jossa aluskatteen alapuolella on tuuletusväli.

Vesikatteen läpi pääsevä sade- tai sulamisvesi valuu aluskatteen pintaa pitkin. Jos lämmöneriste painetaan altapäin tiukasti aluskatetta vasten, niin aluskate voi pullistua

ulospäin. Pullistunut aluskate voi tukkia tuuletusvälin tai ohjata aluskatteen pintaa pitkin valuvan veden kulkemaan korokerimojen kohdalta. Jos sade- tai sulamisvesi pitää korokeriman usein märkänä, niin se voi vaurioitua.

Aluskate ei saa tukkia tuuletusväliä. Tämä täytyy huomioida lämmöneristettä asennettaessa erityisesti silloin, kun lämmöneristeenä käytetään puhallettavaa eristettä. Tarvittaessa voidaan käyttää ylimääräisiä korokerimoja tai muita välikkeitä aluskatteen päällä tuuletusvälin tukkeutumisen estämiseksi.

Aluskatteen pullistuminen on huomioitu Tanskassa, jossa aluskatevalmistajat suosittelevat aluskatteen ja lämmöneristeen väliin jätettävää 10-20 mm tyhjää tilaa [46], [47]. Tämä vara jätetään lämmöneristeen mahdollista myöhempää pullistumista varten. Samalla tällä varmistetaan se, ettei pullistunut lämmöneriste tuki tuuletusväliä. Lisäksi Tanskassa suositellaan tuulensuoja-aluskaterakenteessa käytettävän korokerimoina painekyllästettyä puutavaraa [45], mikä viittaisi siihen, että korokerimojen vaurioitumisen riski on olemassa. Muissa lähteissä tähän ilmiöön ei löytynyt viitteitä.

Aluskatteen pullistumista olisi helppo tutkia kiinnittämällä asiaan huomiota lämmöneristeen asennuksen yhteydessä. Jatkokehitystarpeena ehdotetaan, että tehdään rakenteelle lämmöneristeen testiasennus, jossa tähän ilmiöön kiinnitetään huomiota. Testiasennuksessa pitäisi tutkia kuinka helposti aluskate pullistuu ja pysyy pullistuneena, kun lämmöneristettä asennetaan vinoon yläpohjaan katon alapuolelta. Aluskate olisi tällöin hyvä asentaa kireälle kattokannattajien väliin. Tarpeen vaatiessa rakenteen ohjeita voidaan muuttaa esimerkiksi siten, että aluskatteen päälle asetetaan ylimääräisiä riimoja tai muita välikkeitä, jotka painavat aluskatetta ja siten ohjaavat aluskatteen pinnalla kulkevaa vettä. Toinen vaihtoehto voisi olla lämmöneristeen asentaminen 10-20 mm kattokannattajan yläpinnan alapuolelle, jolloin aluskate jää hieman roikkumaan.

On myös muita rakenteen yksityiskohtia, jotka vaativat huolellisen suunnittelun ennen rakentamista. Näitä ovat muun muassa katon sisätaitteet eli jiirit sekä räystäät ja katon päädyt. Oleellista on, että aluskate saadaan tehtyä kaikkialla yhtenäisenä, jolloin aluskate on mahdollisimman ilmatiivis. Lisäksi sisätaitteessa tulee varmistua aluskatteen sadevedentiiviyydestä, koska siinä katon kaltevuus on muuta kattoa loivempi. Sadevedentiiviys voi vaatia sisätaitteessa käytettävän yhtenäistä ja tukevaa alustaa aluskatteen alla. Lisäksi on harkittava onko tarpeen käyttää tiiviimpää aluskatetuotetta esimerkiksi bitumikermiä sisätaitteen kohdalla. Tällöin jouduttaisiin hyväksymään se asia, että siltä kohdin vesihöyry ei pääse poistumaan katosta aluskatteen läpi, koska bitumikermit on käytännössä vesihöyryä läpäisemätön materiaali.

8.4 Johtopäätökset

Tässä työssä tutkittu tuulensuoja-aluskaterakenne on käytössä ilmastoltaan Suomen kaltaisessa maassa Norjassa ja lisäksi se on käytössä muun muassa Saksassa, Sveitsissä ja Tanskassa. Rakenteen hyvästä kosteusteknisestä toiminnasta on saatavilla selkeää näyttöä eri tutkimuslaitosten tekemistä tutkimuksista eikä rakenteen ole todettu sisältävän

kosteusteknisiä riskejä. Tässä työssä tehty vesihöyrynläpäisevyyskoe sekä rakenteen laskennallinen tarkastelu tukevat aiemmin tehtyjen tutkimusten tuloksia, joiden mukaan rakenne toimii kosteusteknisesti hyvin Suomen ilmasto-olosuhteissa. Näin ollen tämän tutkimuksen perusteella tuulensuoja-aluskaterakenne soveltuu myös Suomen ilmasto-olosuhteisiin.

LÄHTEET

- [1] Björkholtz D. Lämpö ja kosteus – Rakennusfysiikka. 2. painos. Rakennustieto. 1997. 150 s. ISBN 951-682-432-3
- [2] Elmarsson B. ja Nevander L. E. Fukthandbok – Praktik och Teori. Helsingborg 1981, AB Svensk Byggtjänst. 331 s. ISBN 91-7332-158-3
- [3] Kokko E., Ojanen T., Salonvaara M., Hukka A. & Viitanen H. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. Espoo 1999. Valtion Teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1991. 160 s.
- [4] Vinha J., Korpi M., Kalamees T., Eskola L., Palonen J., Kurnitski J., Valovirta I., Mikkilä A. & Jokisalo J. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tampere 2005. Tampereen teknillinen yliopisto, Tutkimusraportti 131. 102 s. + liitt. 10 s.
- [5] Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet - RIL 107-2000. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y. 2000. 211 s. ISBN 978-951-758-509-5
- [6] No 20016 Technical Approval. Vempro R+ combined roof underlay and wind barrier. 2009. Sintef Byggeforsk. 5 s.
- [7] RT N-37226 Tyvek –aluskate/tuulensuoja. 2006, Rakennustietosäätiö. 2 s.
- [8] Puurakenteiden suunnitteluohjeet RIL 120-1991. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y. 1986. 147 s.
- [9] RakMK C2 1.1.1999
- [10] Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. Helsinki 1997, Ympäristöministeriö. 143 s.
- [11] Luotonen P. & Viitanen H. Rakennusten mikrobi- ja hyönteisongelmat. Vantaa 1995, Tikkurila Oy. 49 s.
- [12] Asumisterveys opas. Vammala 2005, Sosiaali- ja terveysministeriö. 184 s.
- [13] Peuhkuri R., Viitanen H., Ojanen T., Vinha J. & Lähdesmäki K. Rakennusmateriaalien homeenkestävyys ja sen mallintaminen pysyvissä kosteusrasitusoloissa. Rakennusfysiikka 2009, Tampere, 2009. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. s. 239-248
- [14] Ojanen T., Peuhkuri R., Viitanen H., Vinha J. & Lähdesmäki K. Homeen kasvun mallintaminen vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Rakennusfysiikka 2009, Tampere, 2009. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. s. 249-258
- [15] Vinha J. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resis-

- tance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Väitöskirja. Tampere 2007. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu 658. 338 s. + liitt. 10 s.
- [16] Haahtela T. Jäitä hattuun hometaloissa. Allergia & Astma 6/2000. s. 5.
- [17] Toimivat Katot [www]. Kattoliitto. 2007. [viitattu 1.11.2010] Saatavilla: http://www.kattoliitto.fi/files/238/Toimivat_Katot_07.pdf
- [18] RT 83-10862 Metallinen saumattu katto. 2006, Rakennustietosäätiö. 28 s.
- [19] Samuelsson I. & Tobin L. Hur ska vindar ventileras? Bygg & teknik 4/04. s. 17-19.
- [20] RT 83-11010 Yläpohjarakenteita. 2010, Rakennustietosäätiö. 25 s.
- [21] Ojanen T., T. Thermal and Moisture Performance of Sealed Cold-Roof System with a Vapor-Permeable Underlay. Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII Integration of Building Envelopes. Clearwater Beach, US, 2 – 7 Dec. 2001. (Proceedings in CD). ASHRAE (2001), 13 s.
- [22] Samuelsson I. Tak utan ventilationspalt – en riskkonstruktion? Bygg & teknik 2/00 s. 49-55.
- [23] Byggforskserien Byggdetaljer 252.102. Isolerte skrå tretak med kombinert undertak og vindsperre. Oslo Norja 2009, Sintef Byggforsk. 8 s.
- [24] Olsson L., Diffusionöppna underlagstak för fuktsäkra tak. Bygg & teknik 4/07. s. 34-35
- [25] Persson Lindgren C. Bygg fuktsäkra takkonstruktioner [www]. 2010. [viitattu 19.1.2011] saatavissa: <http://www.sbuf.se/ProjectArea/Documents/ProjectDocuments/4A9A17EA-7028-4BD0-BFDD-312FF6947CF6%5CFinalReport%5CSBUF%2012321%20Slutrapport%20Bygg%20fuktsäkra%20takkonstruktioner.pdf>
- [26] Good building guide, GBG51. Ventilated and unventilated cold pitched roofs. Lontoo Iso-Britannia 2002, BRE Scotland, CRC Ltd. 6 s.
- [27] Uvslökk S. 2005. Tak med kald loft. Oslo, Norges Byggforskninginstitutt, Prosjektrapport 396, Delrapport fra prosjekt 4 I FoU-programet <<Klima 2000>>. 47 s. + liitt. 21 s.
- [28] Klöber. Broschüre [www]. [viitattu 2.2.2011] Saatavissa: http://www.kloeber-home.de/de/download/de.broschuere.Permo_Unterdeckungen.pdf
- [29] Brandt, E., Hansen, M. H. & Bunch-Nielsen. 2007. Unventilated roof tile underlayments in Denmark. Interface. The Journal of RCI [www]. Vol 25, 9, s. 21-30.[viitattu 16.2.2011] Saatavilla: <http://www.rci-online.org/interface/2007-10-brandt-hansen-bunch-neilson.pdf>

- [30] Glava [www]. [viitattu 3.3.2011] Saatavilla: <http://www.glava.no/proff/bygg/vind-og-dampetting/smarte-tetteprodukter/>
- [31] Isover. Isover Vario AntiSpike – produkt flyer [www]. [viitattu 4.3.2011] Saatavilla: http://www.isover.de/Portaldata/1/Resources/produkte/vario/prospekte/Produkt-Flyer_AntiSpike.pdf
- [32] FRAME-projekti – Future envelope assemblies and HVAC solutions. Helsinki 26.1.2011. Tampereen teknillinen yliopisto. Yleisöseminaarin ensimmäinen Power Point esitys. 25 s.
- [33] Langner L. Bauphysik kompakt – Wärme – Feuchte – Schall. 2. painos. Bauwerk BBB. 2006. Berlin. 296 s. ISBN 3-89932-105-7
- [34] Produktdatenblatt für Unterspannbahnen [www]. Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks. 2008. [viitattu 2.3. 2010] saatavuus: http://www.de-ost.de/uploads/media/Produktdatenblatt_Unterspannbahnen_Endfassung20081027.pdf
- [35] Produktdatenblatt für Unterdeckbahnen [www]. Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks. 2008. [viitattu 2.3. 2010] saatavuus: http://www.de-ost.de/uploads/media/Produktdatenblatt_Unterdeckbahnen_Endfassung20081027.pdf
- [36] Steben P. Vergleichsuntersuchungen zur Wasserdampfdurchlässigkeit von Unterdeck- und Unterspannbahnen und Dampfsperren [www]. Braunschweig, TU Braunschweig. 2005. [viitattu 2.2.2011]. Saatavissa: http://www.bbs-international.com/webfm_send/598
- [37] Rathscheck Schiefer und Dach-Systeme KG. Regeldachneigung [www]. [viitattu 2.2.2011] Saatavissa: <http://www.schiefer.de/schiefer-verlege-bibel/allgemeines/regeldachneigungen/>
- [38] Ziegeldach. [www]. [viitattu 2.2.2011] Saatavissa: <http://www.ziegeldach.de/content/info/schriften/pdf/Qualitaetsfolder.pdf>
- [39] Künzel, H., Grossinsky, T. Nicht belüftet, voll gedämmt. Das Dachdecker-Handwerk 24/89. s. 24-30.
- [40] Schild, Daniel. Dipl. Ing. Timber Constructions; Master in Wood Sciences; Executive Master of Business Administration, Product Manager, Saint Gobain - Isover. Sähköpostihaastattelu 1.2.2011.
- [41] Essah E. A., Sanders C. H., Baker P., Sasic Kalagasidis A. Condensation and moisture transport in cold roofs: effect of roof underlay. Building Research & Information 37(2009)2, s. 117-128.
- [42] Glidevale. BS 5250: 2002, Control of condensation in buildings, Amendment 1, The new roof ventilation, provisions explained [www]. 2006. [viitattu 2.2.2011]

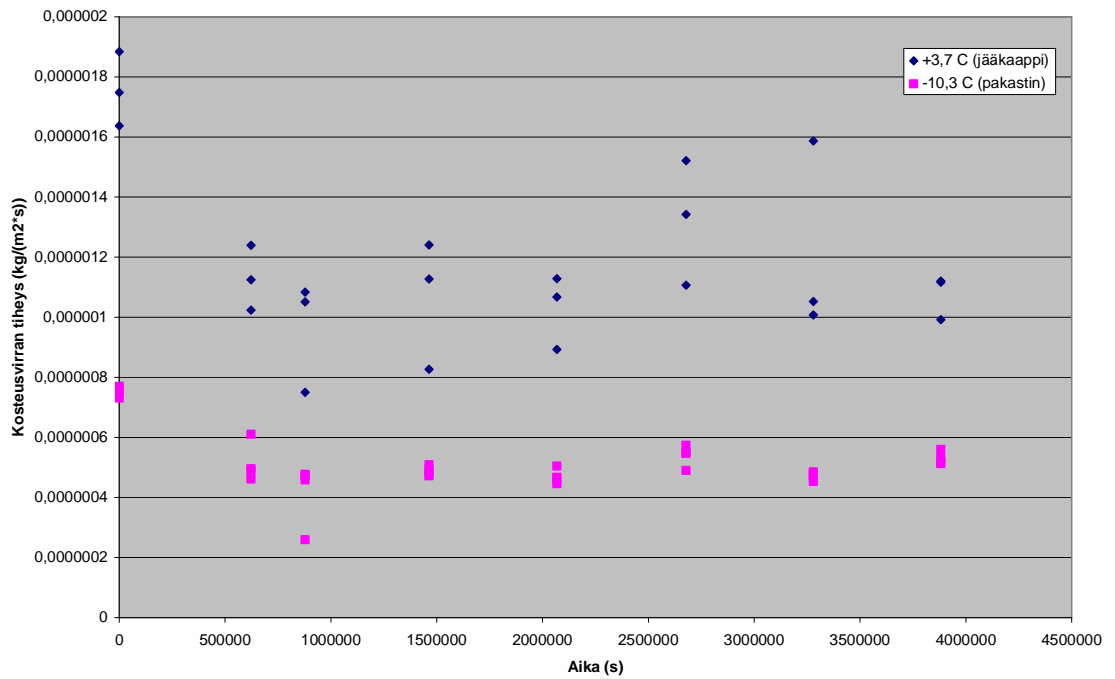
Saatavissa:

http://www.glidevale.com/downloads/condensation_control_bs5250_white_paper.pdf

- [43] Klöber. Underlays, wall membranes & sealing products brochure [www]. [viitattu: 2.2.2011] Saatavissa: [http://www.kloeber-ho-me.de/uk/download/uk.brochures.Underlays Wall Membranes and Adhesive Tapes Product Guide.pdf](http://www.kloeber-ho-me.de/uk/download/uk.brochures.Underlays_Wall_Membranes_and_Adhesive_Tapes_Product_Guide.pdf)
- [44] Glidevale. BS 5250: 2002, Control of condensation in buildings, Amendment 1, Well sealed ceilings explained [www]. [viitattu 2.2.2011] Saatavissa: http://www.glidevale.com/downloads/well_sealed_ceilings_bs5250_white_paper.pdf
- [45] Erfaringsblad 07 06 29 Undertage – diffusionstøtte og diffusionsåbne. BYGGERFA. 4 s.
- [46] Du Pont Tyvek. Diffusionsåbne membraner – til tage og facader [www]. [viitattu 24.5.2011] saatavilla: <http://www.byggros.com/upload/File/Produkter/Datablade/Tyvek/Tyvekbrochure01.10.2010web.pdf>
- [47] Protex undertage [www]. [viitattu 24.5.2011] saatavilla: http://www.profile.dk/filer/undertage_broch_0908.pdf
- [48] Hoelsbrekken S. Feil i tak og loft gir store branner [www]. Statens bygningstekniske ETAT. 2003. [viitattu 2.3.2011] saatavilla: <http://www.be.no/beweb/info/benytt/20031/feilitak.html>
- [49] Byggforskserien Byggetaljer 525.106. Skrå tretak med kaldt loft. Oslo Norja 2005, Norges byggforskningsinstitut. 8 s.
- [50] AMA webbtjänst Hus [www]. Kohta JSC.65 - Vattenavledande skikt av frihängande duk eller folie i yttertak [viitattu 11.2.2011] Saatavilla: <http://ama.byggjtjanst.se/CodeTree.aspx?menuId=4&urvalId=19&pubID=56>
- [51] Dupont. Tyvek Dupont Underlagstak – Broschyr [www]. [viitattu 2.3.2011] saatavilla: http://www.profile.dk/filer/underlagstak_suprogrid.pdf
- [52] Icopal. Broschyr Monarperm 900 [www]. [viitattu 2.3.2011] saatavilla: http://www.icopal.se/upload/icopalse/relaterade_dokument/branta_tak/underlagsprodukter/produktinformation/icopal_broschyr_monarperm900.pdf
- [53] Olsson L. Uppföljande fältundersökning av Tyvek som underlagstak. Malmö 2007, SP Rapport P604697-2. 3 s. + liitt. 14 s.
- [54] Ehnlund A. & Olsson L. Torra tak – Undersökning av oventilerat parallelltak med underlagstakprodukten Tyvek Pro samt undersökning av sellulosaisoleringens fuktegenskaper. Examensarbet. Borås 2000. Högskolan I Borås. 65 s. + liitt. 50 s.

- [55] Harderup L., E. ja Arfvidsson J. Resultat och slutsatser från mätningar I kalla vindsutrymmen. Bygg & teknik 4/07. s.12-17
- [56] Tompuri Vesa. Rakennustekniikan DI. Osastopäällikkö, Kaitos Oy 1989-1996. Puhelinhaastattelu 4.5.2011.
- [57] Ojanen T. ja Heimonen I. Suljettu aluskatejärjestelmä parantaa katon ilmatiiviyttä ja energiataloutta. Rakennustaito 9/2001
- [58] AMA webbtjänst Hus [www]. [viitattu 1.11.2010] Saatavilla: <http://ama.byggjanst.se/CodeTree.aspx?menuId=4&urvalId=19&pubID=56>
- [59] Fukt i bygninger. Oslo 2002, Norges Byggeforskningsinstitut. 465 s. ISBN 82-536-0747-4
- [60] Vinha J., Valovirta I, Korpi M., Mikkilä A. & Käkelä P. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja kosteuden funktiona. Tampere 2005, Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti 129. 101 s. + 211 liites.
- [61] EN ISO 12572. Hygrothermal performance of building materials and –products – Determination of water vapour transmission properties (ISO 12572:2001). Brysseli 2001, European committee for standardization. 33 s.
- [62] Laaksonen J. & Hirsimäki M. Fysiikan oppilaslaboratorio – Virheiden ja tulosten analysoiminen. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisematon ohje. 15 s.
- [63] Pentti M. RTEK-3530 Eristysrakenteet, osa 1 – Luentomoniste syksy 2007. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisematon.

LIITE 1 KOSTEUSVIRRRAN TIHEYDYS AJAN SUHTEEN – KAIKKI MITTAPISTEET



Kuva: Kosteusvirran tiheydet ajan suhteen yksittäisissä kupeissa kokeen ajalta.

LIITE 2 DATALOGGEREIDEN KALIBROINTI

Dataloggerit kalibroidaan siten, että niiden näyttämiä suhteellisen kosteuden arvoja verrataan todelliseen suhteellisen kosteuden arvoon, eli niin sanottuun vertailuarvoon viidessä eri suhteellisen kosteuden arvossa (RH (%) = 11,0; 44,0; 75,0; 84,2 ja 93,4). Tässä työssä korjausterminä on käytetty vertailuarvon ja dataloggerilla mitatun arvon erotusta suhteellisen kosteuden arvolla 44 %. Taulukossa on esitetty vertailuarvot, mitatut suhteellisen kosteuden arvot sekä näiden erotuksena saatava korjaustermi.

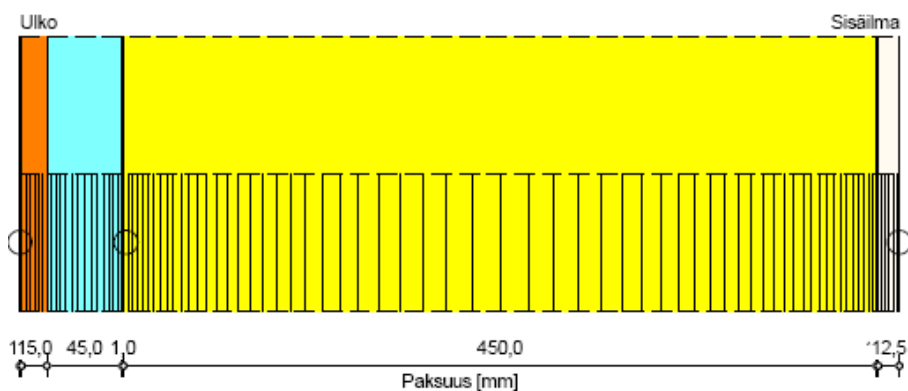
Taulukko: Kupin ulkopuolisen suhteellisen kosteuden mittaamiseen tarkoitettujen dataloggereiden kalibroinnista saatavat suhteellisen kosteuden arvot sekä näistä lasketut korjaustermit.

	Vertailuarvo (%)	Mitattu (%)	Korjaustermi (%)
+3,7 °C	44,0	48,0	4,0
-10,3 °C	44,0	46,5	2,5

Koska molemmat dataloggerit näyttivät kalibroinnissa todellista suurempia arvoja, niin dataloggereiden näyttämien suhteellisten kosteuksien arvoista vähennettiin korjaustermin suuruinen arvo.








LIITE 3 TUULETUSVÄLIN MALLINTAMINEN WUFI:LLA

WUFI:n versiossa 4.2 pro on mahdollista mallintaa rakenteeseen tuulettuva ilmaväli. Laskentaohjelma käsittelee ilmaväliä sekä kosteus että lämmönlähteenä. WUFI:ssa ilmavälin mallintaminen on ongelmallista virtausmekaniikan monimutkaisuuden vuoksi. Jotta saataisiin kuva vesikatteen ja ilmavälin vaikutuksesta rakenteeseen, niin vesikate ja tuuletusväli mallinnettiin laskentamalliin (kuva alla). Tällä laskentatapauksella pyrittiin arvioimaan sitä kuinka paljon laskentatuloksiin vaikuttaa vesikatteen ja tuuletusvälin mallintaminen. Tätä laskentatapausta käytettiin vain laskennan herkkyystarkastelussa.



○ - Monitorointipisteet

Materiaalit :

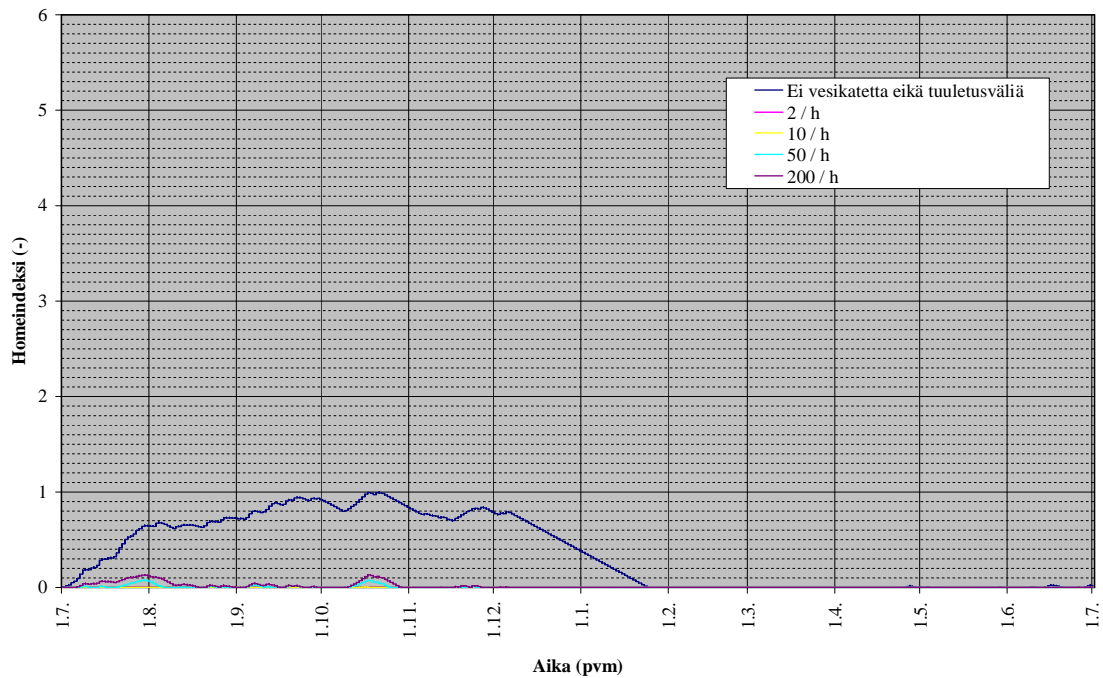
-  - PVC kattopinnoite
-  - Plywood density 410
-  - Ilmakeros 50 mm
-  - weather resistive barrier (sd=0,1m)
-  - Mineraalivilla (Lämmönj.: 0,04 W/mK)
-  - PE-kalvo (Polyeteeni; sd-arvo = 50 m))
-  - Kipsilevy

Kuva: Vesikatteen ja tuuletusvälin mallintaminen WUFI:lla. Tämä on yhden laskentatapauksen malli, jota käytettiin laskennan herkkyystarkastelussa.

Vesikatteenä on tiivis PVC kattopinnoite, jonka alla on 15 mm paksu vanerilevy. Ilmaväli on 45 mm korkea. Ilmavälin tuulettuvuutta mallinnettiin erisuuruisilla ilmanvaihtoluuvilla: 2/h, 10/h, 50/h ja 200/h.

LIITE 4 VESIKATTEEN JA TUULETUSVÄLIN VAIKUTUS HOMEINDEKSIIN

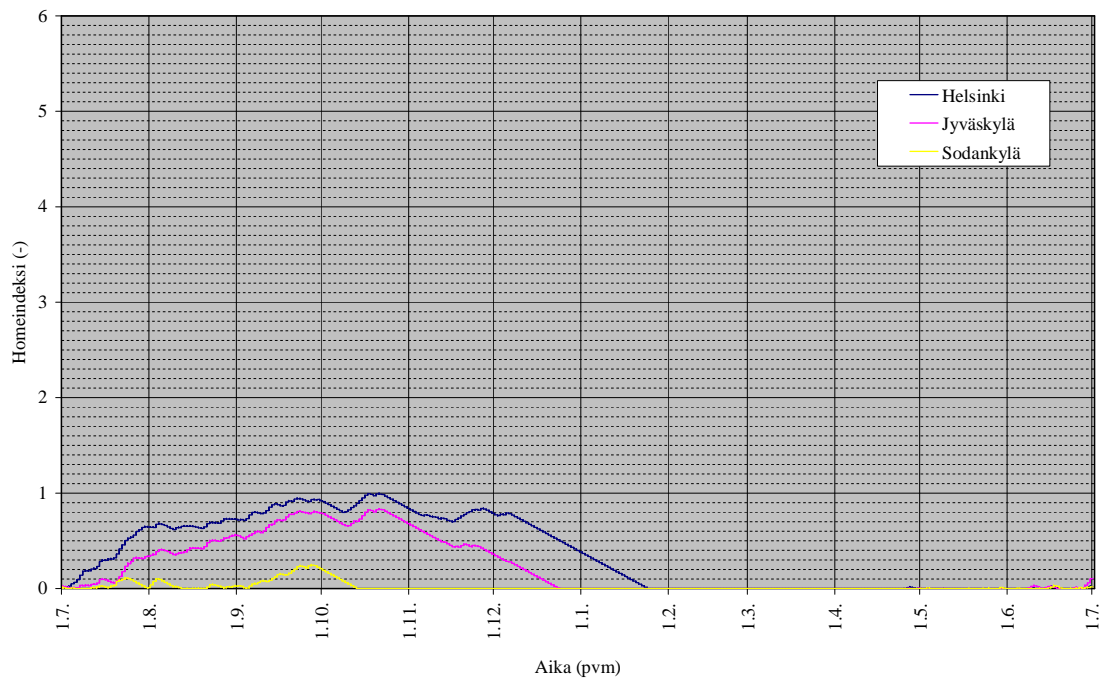
Ilmavälin todellisesta ilman vaihtuvuudesta tai laskennasta todellisia tuloksia tuottavasta ilman vaihtuvuudesta ei ollut tietoa. Niinpä ilmavälin vaikutusta tutkittiin usealla eri ilmanvaihtoluvulla (kuva alla). Tätä laskentatapausta käytettiin laskennan herkkyystarastelussa.



Kuva: Homeindeksi laskettu rakenteelle, johon on mallinnettu vesikate ja tuuletusväli (LIITE 3). Laskennassa on käytetty ilman vaihtuvuutena 2, 5, 10, 50 ja 200 kertaa tunnissa.

Laskennan mukaan vesikate ja tuuletusväli parantavat selvästi rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Rakennetta mallinnettaessa saadaan kriittisimmät olosuhteet, kun vesikate tuuletusväli jätetään kokonaan pois.

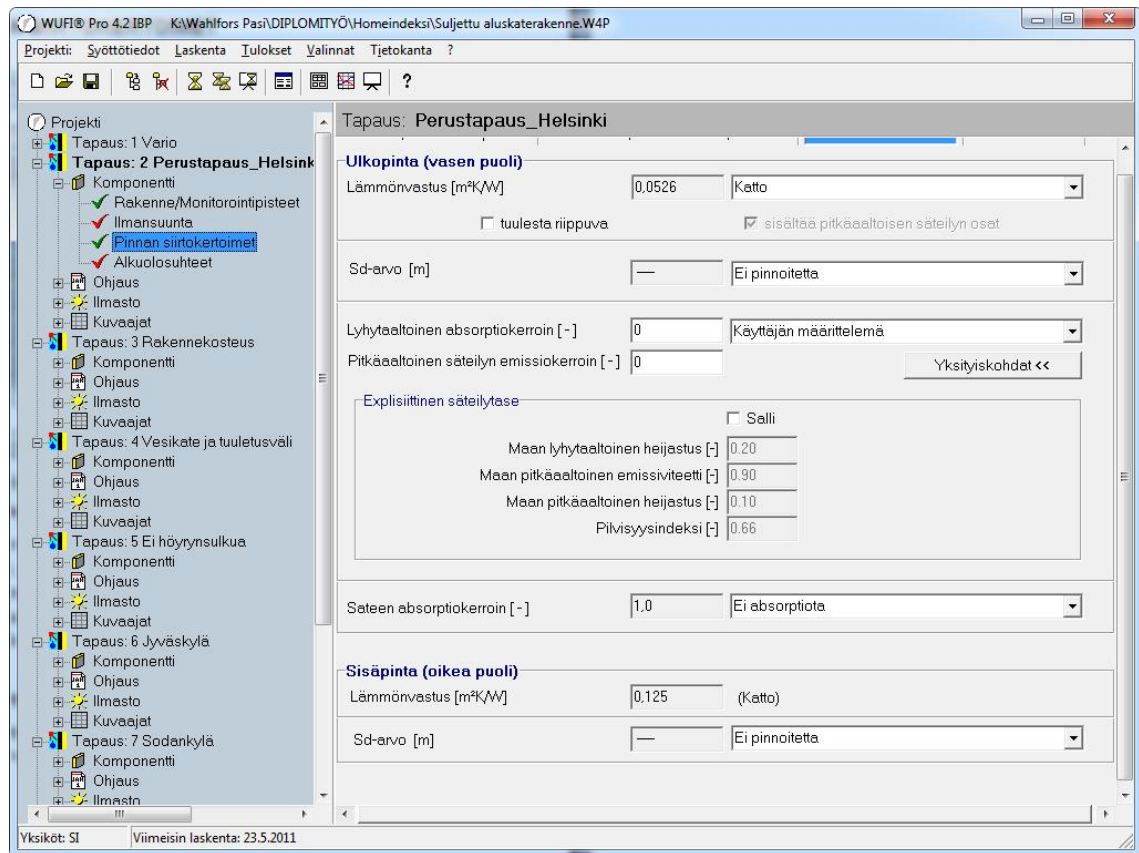
LIITE 5 HOMEINDEKSIN VERTAILU HELSINGIN, JYVÄSKYLÄN JA SODANKYLÄN SÄÄTIEDOILLA



Kuva: Tuulensuoja-aluskaterakenteen homeindeksi laskettuna Helsingin, Jyväskylän ja Sodankylän vuoden 1979 säätiedoilla.

Homeindeksi on suurin, kun olosuhteiksi valitaan Helsingin säätiedot.

LIITE 6 PINNAN SIIRTOKERTOIMET



Kuva: Laskennassa käytetyt pinnan siirtokertoimet.

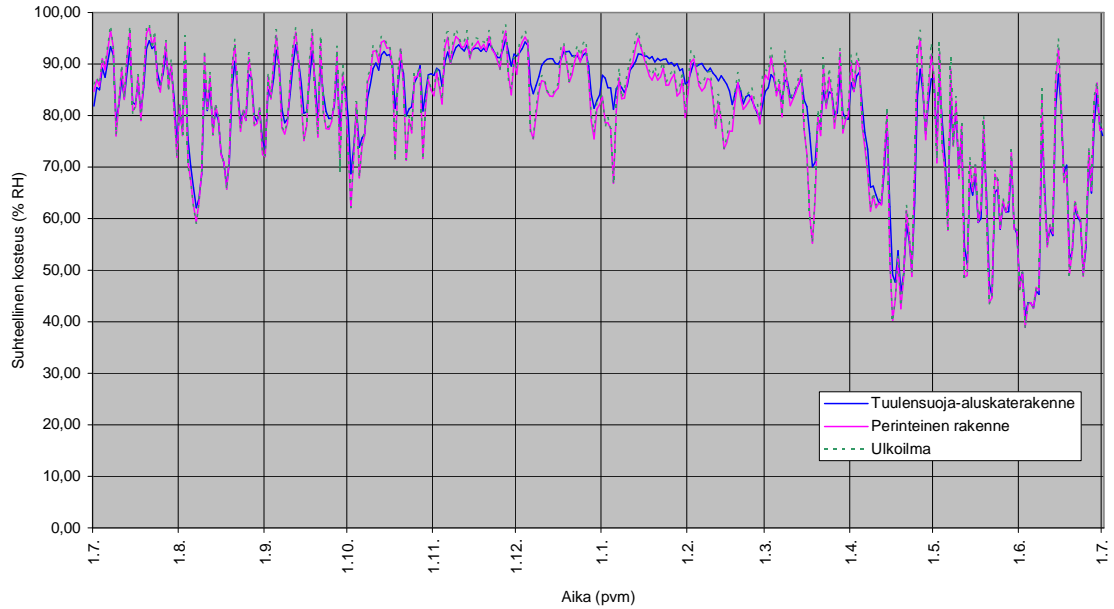
Lämmönvastus (ulkopuoli)

Ulkopinnan lämmönvastuksen arvona käytetään laskennassa laskentaohjelman oletusarvoa kattorakenteelle, joka on $0,0526 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Lämmönvastus kuvaa pinnan lämmönsiirtokerrointa. Käytetty arvo on suhteellisen pieni ja siten rakenteen kosteusteknisen käyttäytymisen kannalta varmallalla puolella. Rakennusmääräyskokoelman osan C4 mukaan pintavastukselle voisi käyttää arvoa $0,115 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (interpoloimalla RakMK C4 taulukosta 2).

Lyhytaaltoinen absorptiokerroin

Lyhytaaltoisen absorptiokerroimen arvona käytetään laskennassa 0. Kerroin kuvaa pinnan kykyä siirtää ja vastaanottaa lämpösäteilyä.

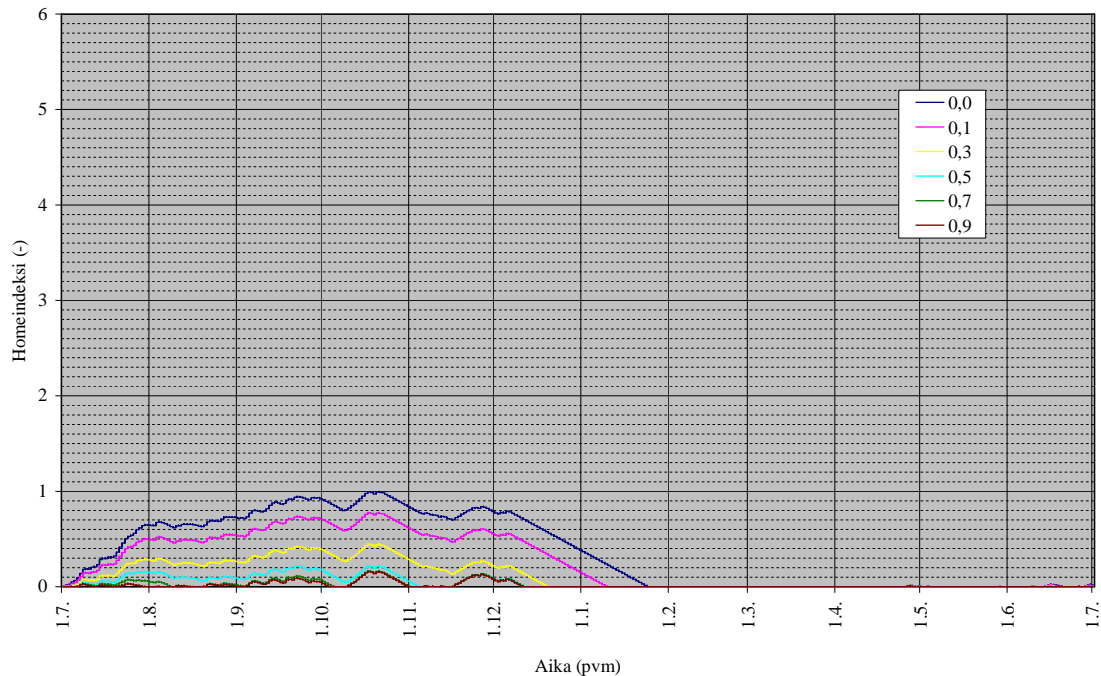
LIITE 7 ULKOILMAN JA VERTAILURAKENTEEN KOSTEUSPITOISUUS



Kuva: Tuulensuoja-aluskaterakenteen, perinteisen rakenteen ja ulkoilman suhteellinen kosteus vuoden aikana vuorokauden keskiarvoina. Tarkastelupiste sijaitsee kaikissa rakenteissa lämmöneristeen ulkopinnassa paitsi ulkoilman tapauksessa. Perinteinen rakenne kuvaa aluskatteen alapuolelta tuuletettua rakennetta.

Molemmissa rakenteissa suhteellinen kosteus seuraa melko tarkasti ulkoilman kosteuspitoisuutta. Tuulensuoja-aluskaterakenteen tapauksessa kosteuspitoisuuden vaihtelut eivät ole niin nopeita kuin perinteisessä aluskatteen alapuolelta tuuletetussa rakenteessa.

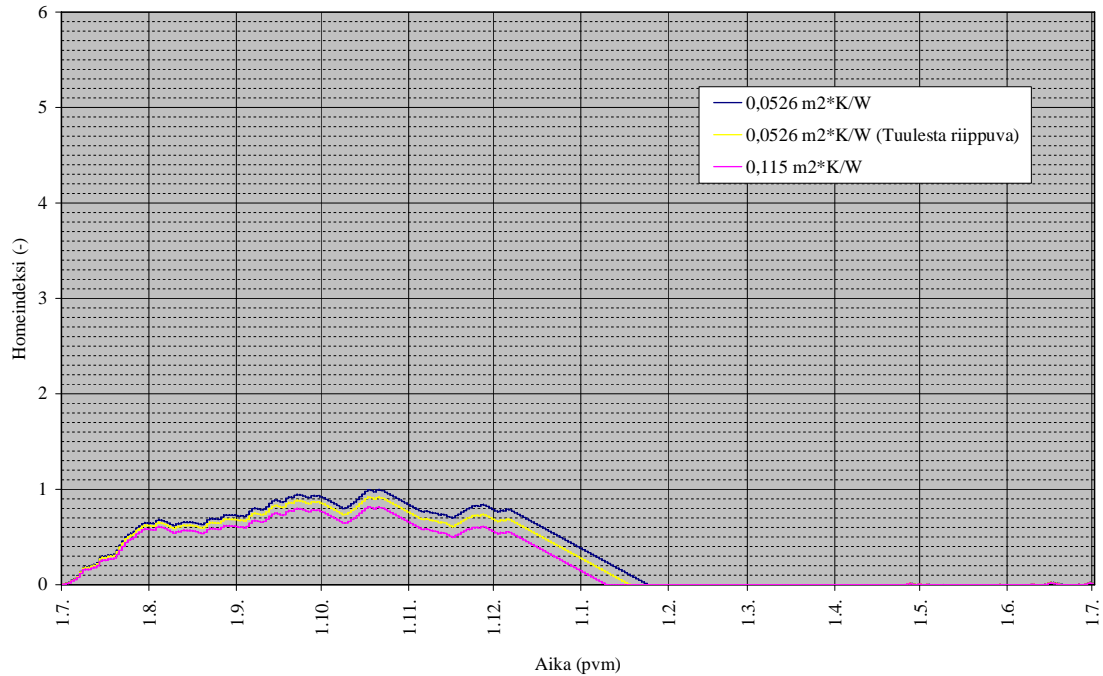
LIITE 8 LYHYTAALTOISEN ABSORPTIOKERTOIMEN VAIKUTUS HOMEINDEKSIIN



Kuva: Tuulensuoja-aluskaterakenteen homeindeksi laskettuna lyhytaaltoisen absorptiokertoimen eri arvoilla. Absorptiokertoimelle käytettiin arvoja 0,0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 ja 0,9.

Kuvasta voidaan huomata, että mitä suurempi lyhytaaltoinen absorptiokerroin on, niin sitä edullisempi on sen vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimintaan ja rakenteen homeindeksiin. Lyhytaaltoisen absorptiokertoimen arvo kuvaa sitä kuinka hyvin materiaalin pinta absorboi säteilyä. Rakennusfysikaalisessa laskennassa kertoimella on kuvattu tavallisesti auringon säteilyn lämmittävää vaikutusta. Absorptiokertoimen arvo riippuu karkeasti pinnan väristä. Vaaleilla pinnoilla absorptiokerroin on alle 0,5, harmailla pinnoilla noin 0,7 ja tummilla pinnoilla noin 0,9 [63].

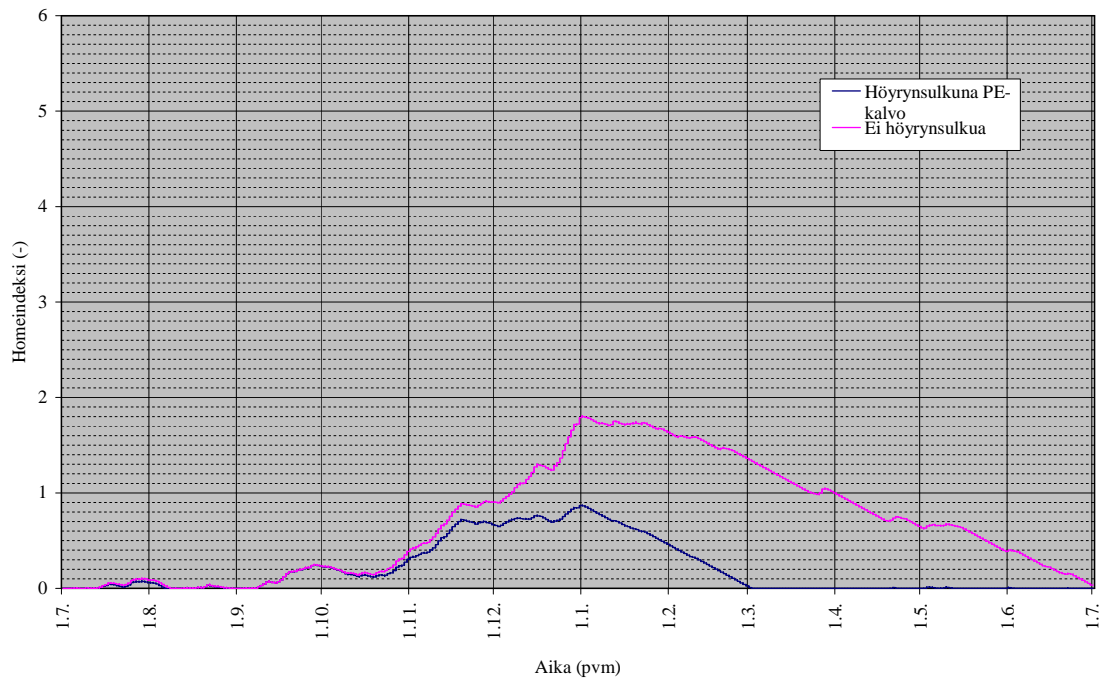
LIITE 9 ULKOPINNAN LÄMMÖNSIIRTOKERTOIMEN VAIKUTUS HOMEINDEKSIIN



Kuva: Tuulensuoja-aluskaterakenteen homeindeksi laskettuna ulkopinnan lämmönsiirtokerroimen eri arvoilla. Ulkopinnan lämmönsiirtokerroimelle käytettiin arvoja $0,0526 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$; $0,0526 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (tuulesta riippuva) ja $0,115 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Ulkopinnan lämmönsiirtokerroimenä on laskennan perustapauksessa käytetty laskentaohjelman oletusarvoa kattorakenteelle, joka on $0,0526 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Laskennassa voidaan käyttää myös tuulesta riippuvaa lämmönsiirtokerrointa, jonka laskentaohjelma määrittää. Standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan laskettuna ulkopinnan lämmönsiirtokerroin (ulkopinnan lämmönvastus) on $0,115 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

LIITE 10 HÖYRYNSULUN PUUTTUMISEN VAIKUTUS HOMEINDEKSIIN



Kuva: Tuulensuoja-aluskaterakenteen homeindeksi laskettuna kahdessa eri tapauksessa. Laskennassa on tutkittu höyrynsulun puuttumisen vaikutusta homeindeksiin. Laskennassa on käytetty poikkeuksellisesti ulkoilman säätietoina Espoon säätietoja.

Laskennan tuloksena saatiin, että homeindeksin arvo on suurempi tapauksessa, jossa rakenteen sisäpuolella ei ole erillistä höyrynsulkua.