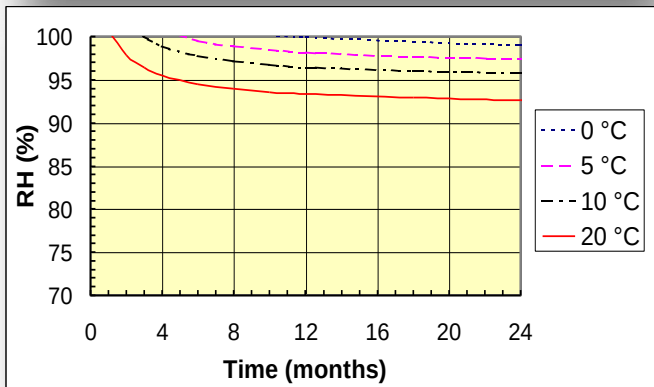
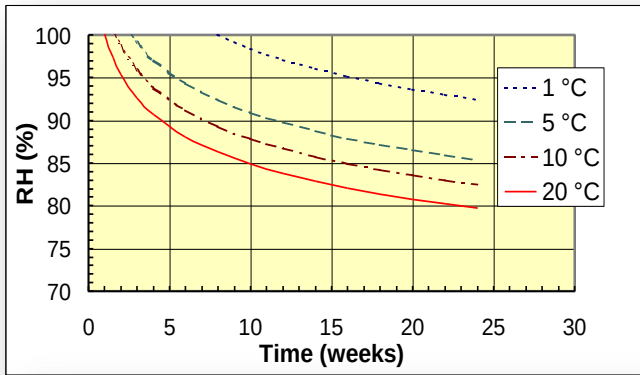
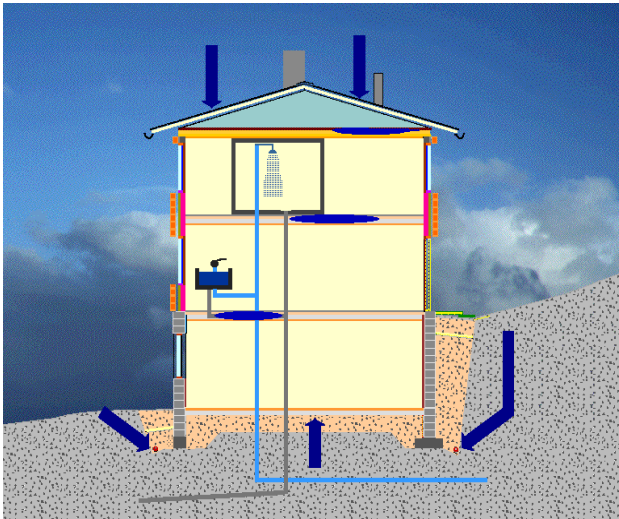


Vaativien puurakenteiden suunnittelu. Elinkaarisuunnittelu.



Hannu Viitanen, FT
Dosentti, Aalto yliopisto
Aviapolis, Vantaa
PUUINFO.
3.4.2019

- **Käyttöikäsuunnittelun tavoitteet**
- **Puurakenteiden kestoikämitoitus ja käyttöikäsuunnittelu**
 - Käyttöikä- / kestoikämenettely
 - Kestävyyteen vaikuttavat tekijät, miten saavutetaan 100 vuoden kestoikä
 - Materiaalit (massiivipuu / liimatut materiaalit),
 - Suunnittelu ja toteutus
 - Ympäristötekijät, käyttö ja huolto
- **Suojausmenettelyt**
 - Rakenteellinen suojaus
 - Puun modifiointi
 - Teollinen kyllästys
 - Pintakäsittely
- **Rakenteellinen suojauksen reunaehdot**
 - Ongelmatapausten lyhyt kuvaus
 - Rakenteellisen puunsuojauksen toimivuus
- **Rakenteiden homehtumisriskien arviointi käytännön suunnittelussa**
 - Homeen ja lahon esto, erilaiset mallit
- **Julkisivujen pitkäaikaiskestävyys, käyttöluokka 3.1**
 - Puujulkisivujen suunnittelu- ja toteutusratkaisut sekä pintakäsittelyt
 - Puujulkisivujen ongelmia, mm maalipintojen homehtuminen
 - Korkeiden rakennusten julkisivujen suunnittelu
- **Ilmaston muutoksen huomioiminen rakenteiden pitkäaikaiskestävyydessä**
 - Rakenteiden kosteustekninen suunnittelu tulevaisuudessa

Käyttöikäsuunnittelun tavoitteet



Käyttöikäsuunnittelussa keskeisenä suunnittelukriteerinä on rakenteen **ikä, toimivuus ja säilyvyys**.

Rakenteet ja niiden suojaus tulee mitoittaa siten, että rakenteiden **käyttöikä** saavuttaa tavoitekäyttöiän, kun materiaalien vanheneminen tai turmeltumisriski otetaan huomioon.

Käyttöikäsuunnittelu / elinkaarisuunnittelu

Keskeiset lähtökohdat

- Puun ja puutuotteiden **toimivuus**: kuormien ja rasitusten kestävyys **ajan suhteen, määritellyissä käyttöoloissa**
- Käyttöikäsuunnittelun kriteeri: **rakenteen ikä ja säilyvyys**, runkorakenteen toiminnallinen kestoikätaavoite **100 vuotta**.
- Puukerrostalojen suunnittelu / pientalojen rakenteet → vaatimukset otettava suunnittelussa huomioon → komponenttien, elementtien ja rakenteiden liittyminen ja toimivuus



Tärkeää ottaa huomioon, mitä pitää tehdä toisin, kun pyritään 100 vuoden toiminnalliseen kestoikään käyttö-luokissa 1 ja 2 sekä kestäviin julkisivuihin korkeissa rakennuksissa (6 - 8 kerrosta).

Kestoikätarkastelut ja tavoitteet

- **Sijoittajan** näkökannat (kohteen arvo)
- **Käyttäjän** näkökannat (ulkonäkö, toimivuus)
- **Rakentajan** / materiaalien toimittajien näkökannat
- **Kokonaisuuden** kannattavuus
 - Rakentamisen yhteydessä tehdyt oikeat ja huolelliset ratkaisut vähentävät käytön aikaisia kustannuksia
- **Rakentamiskustannukset** voidaan jakaa pidemmälle aikavälille, kun ylläpito- ja huoltokustannuksissa säästetään
- **Toimenpiteiden** oikeellisuus, osuvuus ja oikea-aikaisuus vaativat asiantuntevaa suunnittelua ja toteutusta kaikilla tasoilla
- **Suunnittelijan** tehtävänä on ottaa huomioon kestoikätavoitteet sekä niiden toteutuminen yhdessä rakennuttajan ja urakoitsijoiden kanssa: tavoitekäyttöikä ja sen saavuttaminen pitää etukäteen määrittää esim. Eurocode tai kestoikästandardit ISO 15686
- **Puukerrostalossa** esim. materiaalien, komponenttien, elementtien liittyminen sekä detaljien merkitys

Rakennusten ohjeelliset vähimmäiskestöt (ISO 15686-1)

Rakennuksen suunnitteluikä	Kantavat rakenneosat tai luoksepääsemät -tömät rakenteet	Rakennusosat, joiden uusiminen on kallista tai hankalaa	Suurehkot vaihdettavat rakennusosat	Laitteet, installaatiot ja ulkopuoliset työt
Rajoittamaton	Rajoittamaton	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

Esimerkkejä pitkäikäisistä puurakennuksista Suomessa

Rakennus / rakenne	Sijainti	Rakennettu	Ikä (v)
Puuvallilan talot	Helsinki	1910 - >	103
Hvitträskin Suurtupa	Kirkkonummi	1901 - 1903	110
Juuan kirkko	Juva	1850 - 1851	162
Vanha kirkko, Helsinki	Helsinki	1825 - 1826	187
Petäjäveden vanha kirkko	Petäjävesi	1763 – 1765	248
Vanhan Rauman rakennukset	Rauma	Osa ennen v. 1756	>250
Karunan kirkko	Seurasaari, Helsinki	1685 - 1685	328

Säilyvyys- ja kestoikämitoitus

- Tavoitekäyttöiän asettaminen ja laskenta-arvojen määrittäminen
 - Tarvittavien arviointi- ja laskentamallien valinta, valitaan etukäteen sekä suunnitelmien ja toteutuksen yhteydessä
- Ympäristörasitusten ja -vaikutusten arviointi
 - Rakennuksen sijainti (makro-meso-mikroilmasto)
 - Rannikko – sisämaa, veden läheisyys, puusto, maaston muodot
 - Rasitusten merkitys mahdolliseen vioittumis- tai vaurioitumisriskiin
 - Luonnon kuormien ottaminen huomioon (pitkissä kestoikätaavoitteissa)
- Materiaalien ja rakenteiden sekä toteutuksen tarkastelu,
 - Liittymät ja detaljit, suojausratkaisut (mm. pinnoitteet)
 - Toteutuksen tarkastelu, sääsuojat ym. Suojaus kostumiselta
- Huollon ja ylläpidon ratkaisut
 - Määräaikaishuollot, vikojen ja vaurioiden korjaaminen ajoissa
 - Käytöstä johtuvat rasitukset, etenkin kosteuskuormat

Kesto- / käyttöiän arviointimenettely

Arvioinnissa käytetään periaatteessa yksinkertaista menettelyä, jossa ennakoitu komponentin käyttöikä lasketaan kestoikästandardin ISO/DIS 15686 kaavasta

$$ESLC = RSLC \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G$$

missä

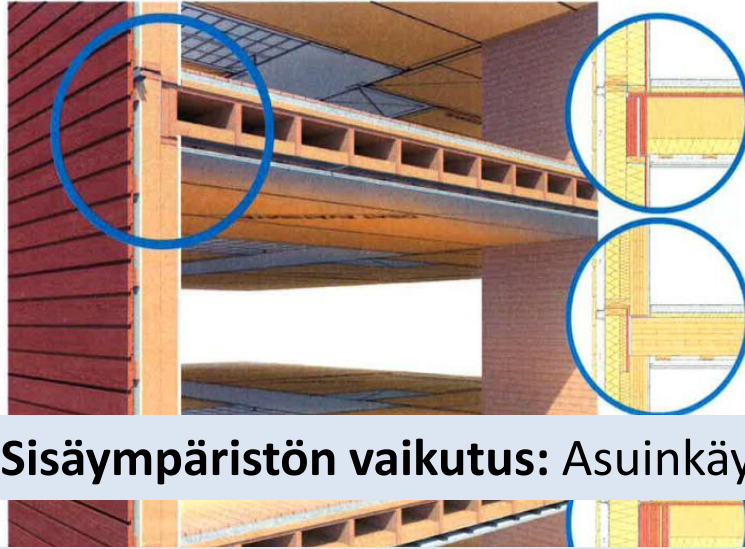
- ESLC = komponentin ennakoitu käyttöikä
- RSLC = vertailukäyttöikä ja
- A...G = eri tekijöitä huomioonottavia muuntokertoimia.

Arviointimenettelyssä muuntokertoimilla otetaan tarkasteluun tekijät, jotka vaikuttavat kestoikään.

Kuhunkin kertoimeen vaikuttavat parametrit otetaan suunnittelussa huomioon.

Muuntokertoimet / osatekijät

A = Materiaalien / komponenttien laatu Puutavara, komponentit ja pinnoitteet



B = Suunnittelun taso

Myös detaljit tärkeitä, ottaen huomioon ympäristön kuormat

C = Rakentamisen toteutus

Suunnitelmien mukainen toteutus, liittymät

D = Sisäympäristön vaikutus: Asuinkäyttö / tehdaskäyttö

E = Käytön aikaiset vaikutukset: kuormat, käyttäjien vaikutukset

G = Huollon taso ja toteutus

Vikojen korjaus, määräaikaishuollot

F = Ulkoympäristön vaikutus

Makro-, meso- ja mikroilmasto, maasto ja muut rakennukset

Materiaalien merkitys kestävyYTEEN

- **Massiivipuu** on ollut perinteinen rakennusmateriaali
- **Hirsirakennus** on perinteinen rakennustyyppi Suomessa
- **Puun luontainen kestävyys** määritellään sydänpuun mukaan,
 - luontaista kestävyyttä tarvitaan lähinnä käyttöluokassa 3
 - kuivissa oloissa kestävät kaikki puulajit
- **Liimattuja puutuotteita** on alettu käyttää rakennustuotteissa jo 1900 luvun alusta, uusimmat ovat mm. **CLT-tuotteet**.
- **Fenoliliimalla** liimattuja puurakenteita käytetty jo lähes 100 v. ja toimivat edelleen hyvin
- **Vanerien** valmistus aloitettiin jo aikaisemmin ja kuivissa oloissa niiden kestävyydellä ei ole havaittu erityisiä ongelmia
- **LVL ja OSB** ovat on havuvanerin kaltaisia tuotteita
- **Tutkimusten** ja käytännön havaintojen mukaan liimattujen puutuotteiden kestävyys on verrannollinen massiivipuuhun
- **Liimapuussa** mahdolliset ongelmat johtuvat puumateriaalista, ei liimasaumasta



Liimattujen rakenteiden pitkäaikaiskestävyys (1)

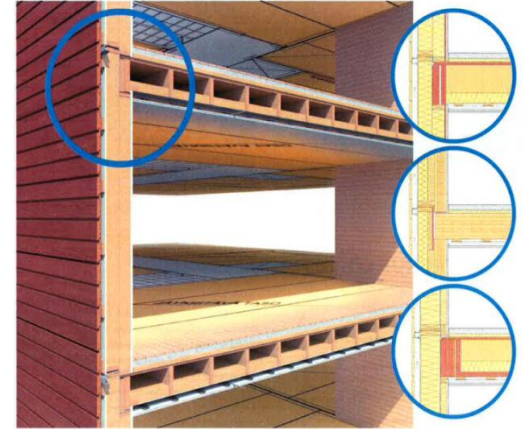
- **Liimattuja puutuotteita** on alettu käyttää rakennustuotteissa jo 1900 luvun alusta ja fenoliliimalla liimattuja puurakenteita käytetty jo lähes 100 v. Toimivat edelleen hyvin, pitkäaikaiskestävyys ei muodosta erityistä ongelmaa.
- **Uusimpia** tuoteryhmiä ovat mm. **CLT** (Cross Laminated Timber) tuotteet.
- **Pinnoitettuja koivuvanereita** on käytetty Suomessa jo pitkään, etenkin fenolifilmipinnoitetut (erilaiset rakenteet) sekä maalauskalvolla pinnoitetut ja maalatut (esim. liikennemerkkit). VTT:n tutkimusten mukaan pitkäaikaiskestävyys on näillä tuotteilla hyvä, kun reunat on suojattu.
- **Pinnoittamattoman vanerin ja kertopuun pintaviilu** on herkempi homeelle kuin vastaava massiivi puu: pintaviilu on ohuempi ja reagoi nopeasti kosteuteen. **Ajoittain kosteissa rakenteissa** (esim. vesikaton alusta) on puutuotteet pintakäsiteltävä kosteutta ja homeita vastaan.
- **LVL** on on havuvanerin kaltainen tuote. **Liimapuusta** tehty ns. kuningaspaneeli on osoittautunut kestäväksi julkisivumateriaaliksi.

Liimattujen rakenteiden pitkäaikaiskestävyys (2)

- **Liimapuussa** mahdolliset kestävyysongelmat johtuvat puumateriaalista, ei liimasaumasta. Sälle alttiit rakenteet on suojattava säärasitukselta: rakenteellinen suojaus, pintakäsittely tai kyllästys käyttörasituksesta riippuen.
 - Liimapuusta tehty ns. kuningaspaneeli on osoittautunut kestäväksi julkisivumateriaaliksi
- **Liimapuurakenteiden halkeilun syyt**
 - Materiaali- ja valmistusvirheet, liimausvirhe merkittävin (onneksi harvoin)
 - Leikkausrasitusten ylittyminen, palkin lappeessa pituussuuntainen halkeama, palkin tukien lähellä
 - Syitä vastaan kohtisuoran vetorasituksen ylittyminen
 - Kaareva palkki -> taivutusmomentti pyrkii suoristamaan
 - Nurin käännetty ”mahapalkki”
 - Puun kuivuminen (kostumis – kuivumissyklit), ei yleensä vakava
 - Ripustukset
 - Ulkorasitukset (jatkuvat kosteusmuutokset)

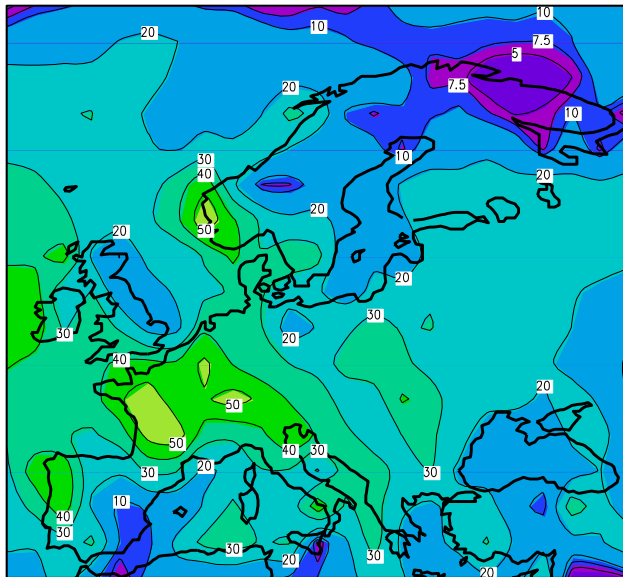
Suunnittelu ja rakentaminen

- **Materiaalien** valinta ja liittynät toisiinsa
- **Kostumisen esto** / kuivumismahdollisuus
- **Detaljien** suunnittelu ja toteutus
- **Liitosten** ja saumojen toteutus
- Komponenttien ja elementtien rakentaminen **suojuissa tiloissa**
 - Pidemmälle valmis, pienempi säärasitus rakennettaessa
 - Erilaisia ratkaisuja toteutettavissa: RunkoPES, PuuERA, UrbanMultistorey, puukerrostalo...
- **Paikalla rakentaminen** ja suojarakenteiden käyttö
 - Suositeltavaa mahdollisimman nopea toteutus (vältettävä virheet)
- **Työvaiheiden toteutus:** tehdas, rakennustyömaa, ajankohta toimenpiteille → logistiikka
- **Räystäät**, lipat ja suojaavat rakenteet (pellitykset, suojaalistat) ja muut tekniset yksityiskohdat oltava kunnossa



Ulkoilman sääolojen vaikutus sateille alttiina olevan puun lahoamisalttiuteen Euroopassa ja auringon säteily (Viitanen et al 2009)

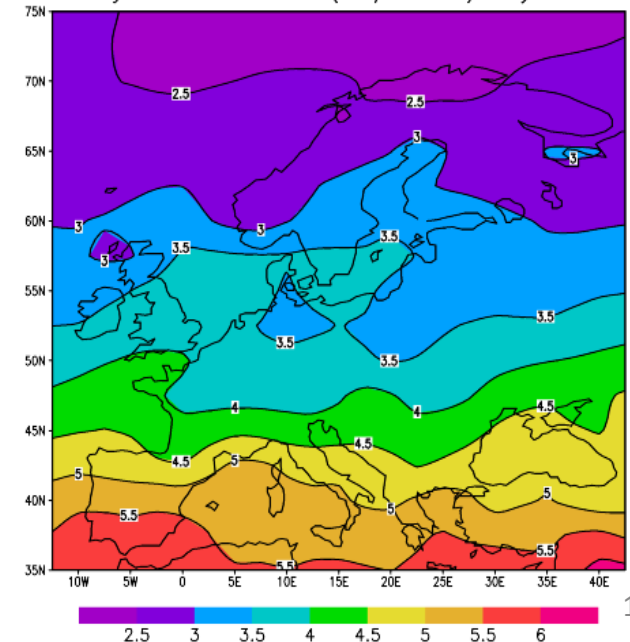
Massloss (%) ERA40 1961–70



Auringon säteily Euroopassa säälle alttiilla pinnoilla. Etelä-Euroopassa säteily on selvästi aktiivisempaa kuin pohjoisessa.

**Arvio perustuu lahomallin hyödyntämiseen 10 vuoden säätietoihin (Viitanen et al. 2010).
Puun pinnan lahoamisalttiuteen (mass loss %) eri puolilla Eurooppaa.
Pohjois Euroopassa lahoa on vähemmän ja Pohjois-Lapissa lähes olematonta.**

Yearly solar radiation (GW/m²*s) 30yr mean

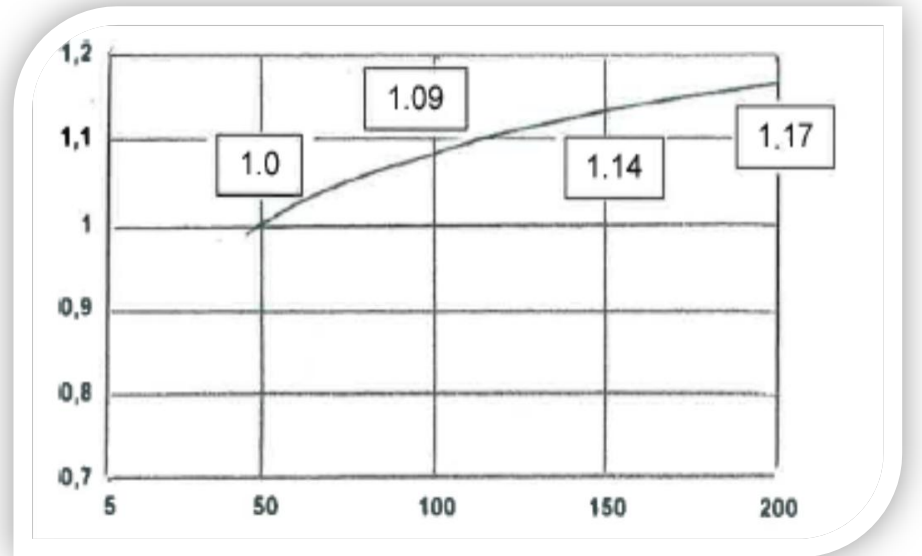


Runkorakenteet: tavoitteena 100 vuoden kestoikä, käyttöluokat 1 ja 2

(VTT-R-04689-14)

- Laajennettaessa kestoikätaavoitetta 50 vuodesta 100 vuoteen, on otettava erikseen huomioon mahdollisista **luonnonkuormista johtuvat lisäkuormat**
- Suunnitellun käyttöiän ollessa **yli 50 vuotta** kuormien ominaisarvoja **korotetaan 10 prosentilla**
- Suunnitellun käyttöiän ollessa **yli 100 vuotta** kuormien ominaisarvoja korotetaan **20 prosentilla**

Ympäristön (ilmaston) aiheuttaman kuorman ja suunnitellun kestoikä välinen riippuvuus. Lähtökohtana on 50 vuoden käyttö. Ilmastokuormia ovat lumi, tuuli, jää, ulkoilman kosteuden ja lämpötilan vaihtelut (Weck, 2013, Tikanoja 2013)



Tekijöiden A – G arvoja kestoikäarvioinnissa käyttöluokassa 1; kuivat olot

(VTT-R-04689-14)

Tekijä	Nimi	Heikko	Kohtuull	Normaali	Hyvä	Erinomainen
A	Komponentin laatu	0.95	0.98	1	1.02	1.05
B	Suunnittelu	0.6	0.8	1	1.3	1.8
C	Rakentaminen	0.6	0.8	1	1.3	1.8
D	Sisäympäristö ⁽¹⁾		0.98	1	1.02	
E	Ulkoympäristö ⁽²⁾			1	1.5	1.8
F	Käyttöolot	0.9	0.95	1	1.05	1.1
G	Huollon taso	0.8	0.9	1	1.3	1.5

(¹ käyttöluokka 1, kuivat olosuhteet (pieni sisäympäristön vaikutus)

(² käyttöluokka 1, kuivat olosuhteet, säältä suojattu (ei ulkoilman vaikutusta ja valikkona on hyvä tai erinomainen)

Tekijöiden A – G arvoja kestoikäarvioinnissa käyttöluokassa 2; kosteusolot kohtuulliset (VTT-R-04689-14)

Tekijä	Nimi	Heikko	Kohtuull.	Normaali	Hyvä	Erinomainen
A	Komponentin laatu	0.90	0.95	1	1.1	1.2
B	Suunnittelu	0.6	0.8	1	1.3	1.8
C	Rakentaminen	0.6	0.8	1	1.3	1.8
D	Sisäympäristö ⁽¹⁾		0.9	1		
E	Ulkoympäristö ⁽²⁾	0.8	0.9	1	1.2	1.5
F	Käyttöolot	0.9	0.95	1	1.05	1.1
G	Huollon taso	0.8	0.9	1	1.3	1.5

⁽¹⁾ pintakäsittely (suojaus vettä, kosteutta ja hometta vastaan lisää kestävyyttä)

⁽²⁾ käyttöluokka 2, sisäympäristöllä ei vaikutusta tai se on negatiivinen (ei lämmitystä)

⁽³⁾ käyttöluokka 2, suojattu säältä (ulkoilman vaikutus pieni) riippuen toisaalta ympäristön makro- ja mesoilmastosta. Erinomainen kuvastaa Pohjois-Suomen suhteellisen pientä ulkoilman merkitystä verrattuna mannermaiseen ilmastoon (arvo 1 Helsinki ja Pohjois-Eurooppa).

Arvot 0.8 and 0.9 kuvastavat ilmaston ankarampaa merkitystä käyttöluokassa 2.

Esimerkki kestoikä tarkastelusta (VTT-R-04689-14)

Käyttöluokka 1 Välipohjapalkisto

RSL	= 50	Selite
A	= 1.0	(normaali puun laatu)
B	= 1.3	(hyvä suunnittelu)
C	= 1.3	(hyvä rakentamisen taso)
D	= 1.0	(normaali sisäympäristö)
E	= 1.8	(käyttöluokka 1)
F	= 1.0	(normaali käyttö)
G	= 1.0	(normaali huolto)
ESL	= 152	kestoikäarvio vuosina

Käyttöluokka 2 Ulkovarasto

RSL	= 50	Selite
A	= 1.1	(normaali laatu + pinnoitus)
B	= 1.3	(hyvä suunnittelu)
C	= 1.3	(hyvä rakentamisen taso)
D	= 0.9	(ei lämmitystä)
E	= 1.0	(käyttöluokka 2)
F	= 1.0	(normaali käyttö)
G	= 1.3	(normaali huolto)
ESL	= 108	kestoikäarvio vuosina

Näin saavutetaan yli 100 vuoden toiminnallinen kestävyys - käyttöluokat 1 ja 2

(VTT-R-04689-14)



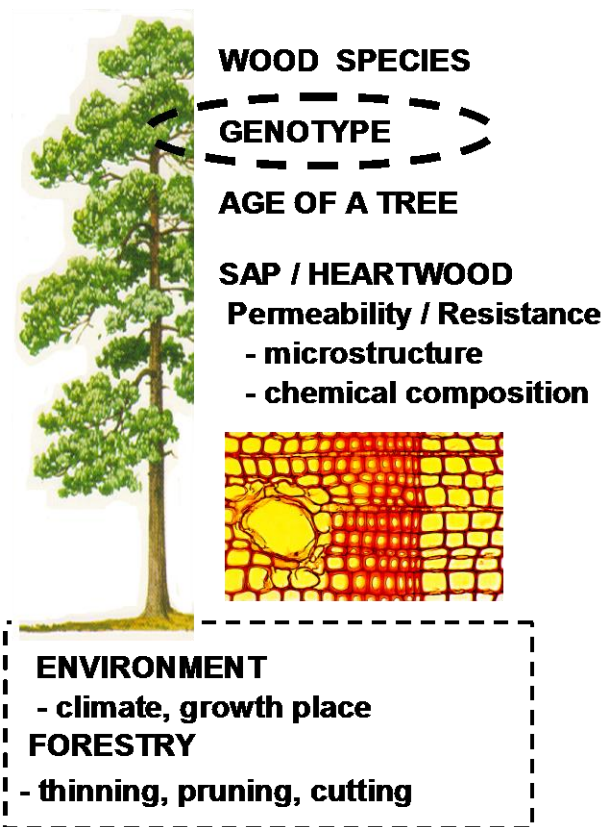
- Käytetään kuivaa CE merkittyä puumateriaalia
- Oikea liimatyyppe: vanerit, kertopuu, liimapuu, CLT tuotteet
- Kosteusteknisesti toimivat suunnitteluratkaisut ja detaljit – vältetään rakennevirheet ja hoidetaan suojaus säätä vastaan
- Hyvä rakennustapa: materiaalit ja komponentit valmiiksi kuivissa oloissa - suojataan rakennukset säältä rakennusvaiheessa – kuiva rakentaminen koko prosessin läpi
- Otetaan luonnonkuormien muutokset huomioon suunnittelussa
- Huolto-ohjeet käyttäjille ja huollon oikea-aikainen toteutus
- Varmistetaan oikeat materiaalin vaatimat olosuhteet koko rakennuksen käyttöajan: ilmanvaihto, suojaus kosteudelta, yllättävien kosteusongelmien kuivaus tehokkaasti ja ajallaan.

Homeen ja lahon esto:

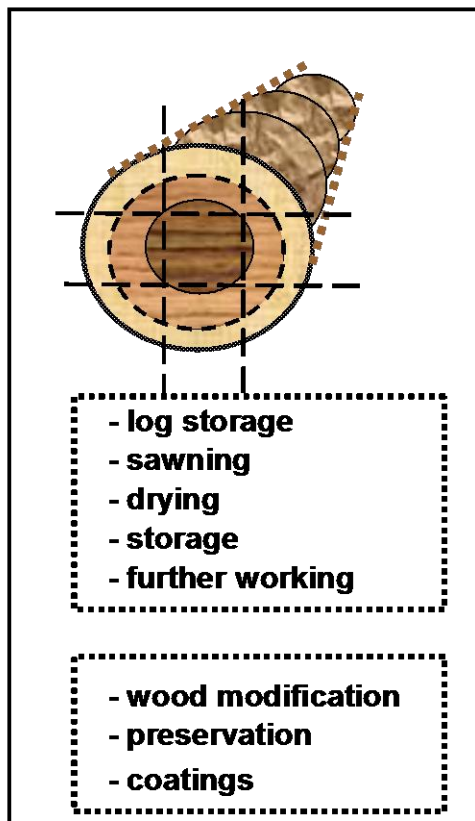
Puun kestävyysvaikuttavat monet tekijät

FACTORS AFFECTING DURABILITY OF WOODEN PRODUCTS

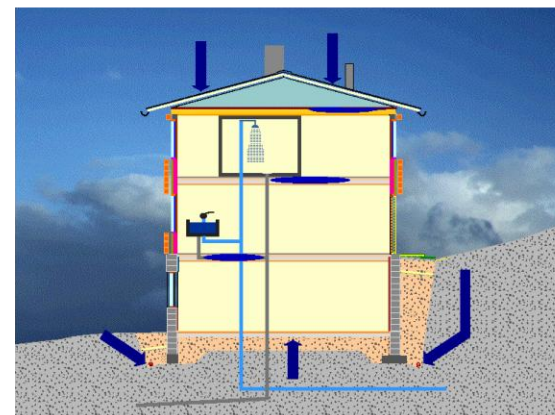
WOODEN MATERIAL



WOOD WORKING AND TREATMENTS



USE OF WOOD PRODUCTS



- transport and storage of materials
- structures (design, work execution)
- building site and environment, exposure conditions
 - humidity, temperature, duration, presence of harmful organisms
- protection and surface treatments
- use conditions and maintenance

Puun homeen kestävyys vaihtelee riippuen sekä puulajista että prosesseista, mm. kuivauksesta

- **Useimpien puulajien pintapuu** homehtuu tai sinistyy ajan mittaan. Keski-Euroopassa tätä ei edes pidetä ongelmana ?
- **Männyn pintapuu** herkempi kuin kuusi tai männyn sydänpuu
- **Homeen ja sinistymän haitat** näkyvät lähinnä maalatussa puussa, maalatussa pinnassa väriviat näkyvät herkemmin
- **Yleensä kemialliset modifiointikäsitteilyt** (mm. asetylointi) ja kyllästeet lisäävät puun kestävyyttä hometta ja sinistymää vastaan sekä lahoa vastaan.
- **Lämpökäsittely** lisää puumateriaalin kestävyyttä kosteutta ja lahoa vastaan. Vaikutus on pienempi säälle altistuvissa pinnoissa -> väri haalistuu ajan mittaan ja pintaan tulee hometta ja sinistymää -> pintakäsittely lisää kestävyyttä



Sydänpuun luontainen lahonkestävyys (EN 350-2)

suuntaa-antava arviointimenettely

Luokka	Kestävyys	Esimerkkilajeja
1	hyvin kestävä	tiikki, iroko, afzelia, bilinga
2	kestävä	jättituija, amerikanmahonki, tammi
3	kohtalaisesti kestävä	mänty, lehtikuusi, douglaskuusi, hikkori, afrikanmahonki
4	jonkin verran kestävä	mänty, kuusi, hemlok, kuusi
5	ei kestävä	koivu, leppä, haapa, pyökki, vaahtera

Suojausmenettely varmistaa: rakenteen materiaaleissa ei tapahdu ennenaikaista vioittumista tai vaurioitumista

- **Rakenteellinen suojaus:** materiaaliin ei kohdistu toimivuutta heikentävää tai vaurioita aiheuttavaa kosteuskuormitusta.
- **Puun modifiointi:** itse materiaalin kestävyysominaisuuksia parannetaan.
- **Puun kyllästys / kemiallinen suojaus:** puun käsittely aineilla, jotka lisäävät ja varmistavat puutuotteiden käytettävyyttä ja kestävyyttä .
 - **Teollinen kyllästys:** A ja AB luokan kestopuu (NTR)
 - **A:** maakosketus, **AB** : maan pinnan yläpuoliset ulkorakenteet
- **Pintakäsittely:** suojattavaan materiaaliin ei kohdistu materiaalille kriittistä kosteusrasitusta. Useita pintakäsittely-yhdistelmiä käytössä .
 - **Pinnoituksen kestoikä** on usein lyhyempi kuin itse materiaalin: uusintakäsittelyt tarpeen

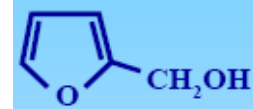
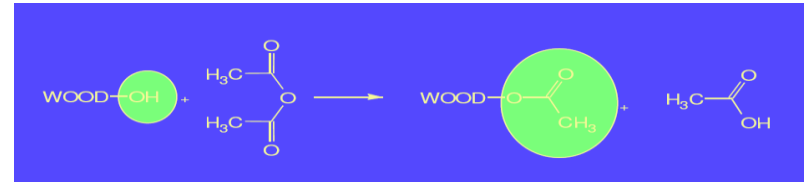
Rakenteellinen puunsuojaus

- Tarkoittaa kaikkia niitä toimenpiteitä, joilla
 - estetään puun liiallinen ja pitkäaikainen kostuminen
 - sallitaan puun kuivuminen tilapäisen tai satunnaisen kostumisen jälkeen
 - estetään kosteuden aiheuttamat puun vioittumisreaktiot
- Rakennusohjeisto kauttaaltaan pitää sisällään lukemattomia määräyksiä, ohjeita ja suosituksia, joilla päämäärään pyritään
 - **Tärkeimmät ovat kosteuden hallintaan liittyvät ohjeet ja määräykset.**

Puun modifiointikäsittelyjä

- **Kemialliset**

- Asetylointi (OH reaktiot)
 - TitanWood (NL) tuotteet
- Furfulointi,
 - Kebony tuotteet



Furfuryl alcohol

- **Fysikaaliset**

- Lämpökäsittelyt
 - Thermowood
- Kuumennus- ja puristuskäsittelyt
- Kuumaöljykäsittelyt



Accoya (asetylointi) käsittelyjen tuloksia, tehokkuus lahoa vastaan (Bongers et al 2013)

Laboratoriossa tehty kestävyyskoe (AWPA E10-06) ruskolahottajasieniä vastaan USA:ssa

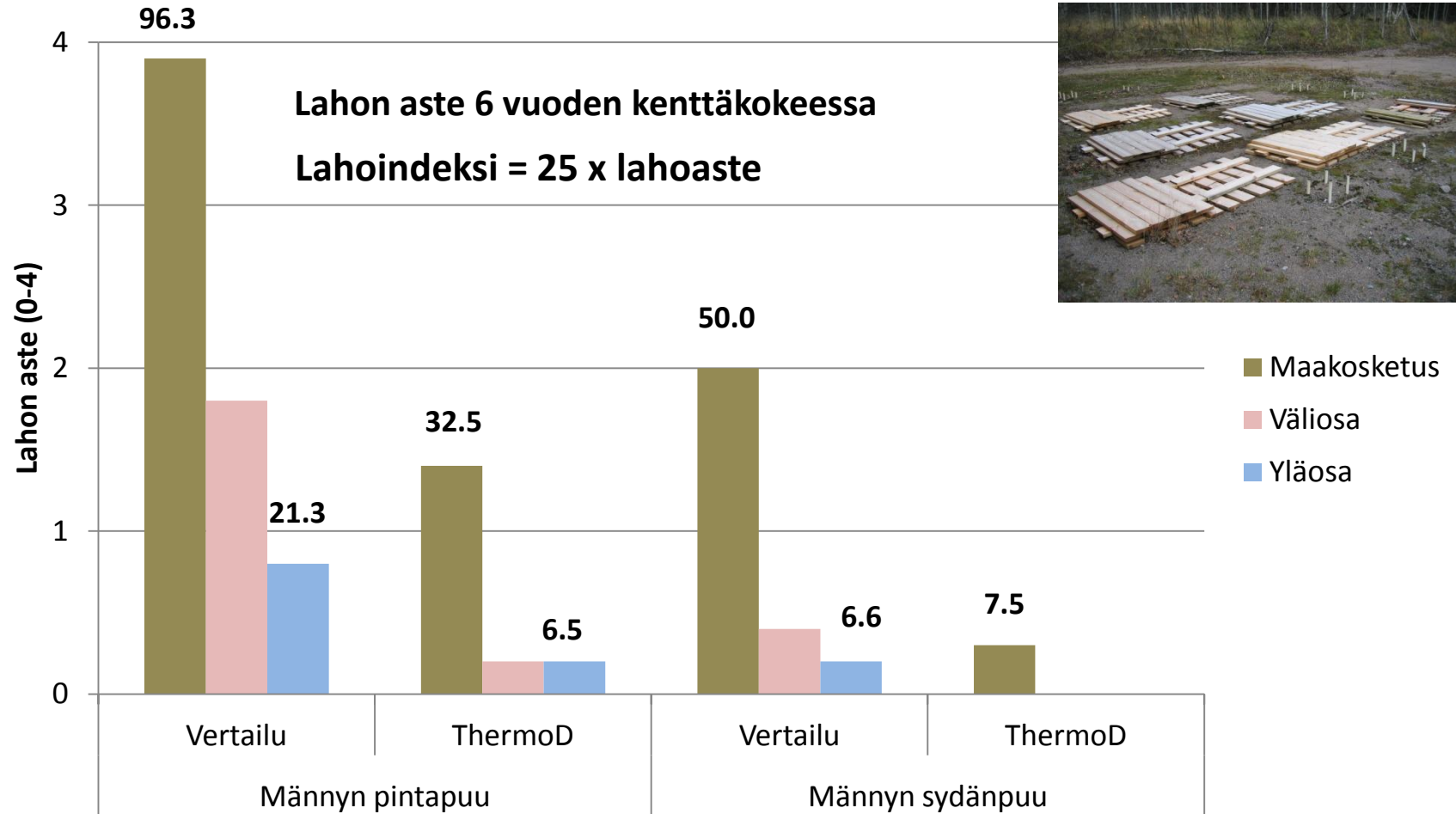
Material Type	Mean Mass Loss [%]		
	<i>G. trabeum</i>	<i>N. lepideus</i>	<i>P. placenta</i>
Accoya® Radiata pine (NZ)	-0.1	-0.2	0.0
Accoya® Radiata pine (Chile)	0.3	-0.2	0.0
Accoya® SYP	0.0	-0.4	0.0
Untreated Radiata pine (NZ)	62.3	19.7	28.2
Untreated Radiata pine (Chile)	50.1	19.6	30.5
Untreated SYP	42.5	21.1	28.6

Sienikellaritesti (Scion, Rotorua, Uusi Seelanti)

Material Type	Decay Rating ^a		
	2 years	4 years	8 years
Accoya® Radiata pine	10.0	10.0	9.9
Untreated Radiata pine	0.0	0.0	0.0
Kwila (Merbau)	7.1	4.8	3.4

^a10 = Sound, 0 = Complete failure

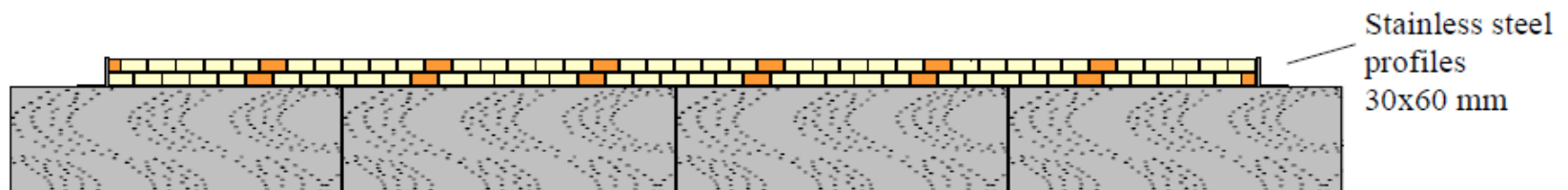
Thermowood D ja käsittelemättömän männyn pinta- ja sydänpuun lahon kestävyys 6 vuoden kenttäkokeen jälkeen, Espoo Otaniemi, VTT:n koekenttä, ns. sovellettu double layer (Metsä-Kortelainen & Viitanen 2015)



"COST E 37 Double layer" kokeiden tuloksia, TMT = Thermowood

(Westin et al 2013)

Geographic region	Wood material type	Index of Decay (0-100%)					
		1 year	2 yrs	3 yrs	4 yrs	5 yrs	6 yrs
Nordic Fields	Control	0,0	1,9	4,4	20,0	34,9	54,2
	TMT-UC2	0,0	1,9	2,5	8,1	13,8	28,3
	TMT-UC3	0,0	0,0	2,5	3,8	6,9	15,0
	Organic Low retention	0,0	0,6	1,3	5,6	10,6	9,2
	Organic High retention	0,0	0,0	0,6	1,3	0,0	4,2
	CCA Medium retention	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CCA High retention	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Southern European fields	Control	16,3	16,3	26,3	25,0	37,5	67,5
	TMT-UC2	1,3	7,5	17,5	42,5	55,0	75,0
	TMT-UC3	1,3	6,3	11,3	25,0	40,0	43,8
	Organic Low retention	0,0	0,0	3,8	0,0	2,5	7,5
	Organic High retention	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0



Puun teollinen kyllästys

- **Tarkoitettu ankariin käyttöoloihin**, joissa lahoriski olennainen
 - Maakosketus ja tukirakenteet (pylväät, aidan seipäät)
 - Säälle alttiit terassit, laiturit, aitojen turkirakenteet ja pergolat
- **Tuotanto teollisesti ja aineet sallittu** vain teollisuuden käyttöön
 - Vesipohjaiset aineet, yleensä kupariyhdisteitä
 - Öljypohjaiset aineet, yleisin ollut kreosoottiöljy (ratapölkyt)
- **Puulaji mänty**, jossa pintapuu pyritään kyllästämään kauttaaltaan, sydänpuu ei yleensä kyllästy
- **Puulaji mänty, sydänpuu** (luokat: HW ikkunat ja HC julkisivut)
- **Kuusella** onnistuu vain paikoittainen tunkeuma, NTR:lla nyt myös luokiteltu tuote (GW kuusi julkisivuissa).
- Myös **kemiallisesti modifioidulle puulle** luotu luokitusperusteet

NWPC wood protection classes in relation to EN 351-1, wood protection classes and EN 335, use classes, (NWPC Doc 1: 2017 part 1)

Penetration class according to EN 351-1		Use classes UC1-UC5 according to EN 335-1 and their relation to the wood preservation classes M, A, AB, B, GRAN and GW				
Class	Penetration Requirement	UC 1	UC 2	UC 3	UC 4	UC 5
NP 1	None			GRAN GW HC HW		
NP 2	Min 3 mm lateral into sapwood					
NP 3	Min 6 mm lateral into sapwood			B B mod		
NP 4	Min 25 mm					
NP 5	Full sapwood			AB AB mod	A A mod A pole	M M mod
NP 6	Full sapwood + 6 mm into heartwood					

Use of impregnated wood

- **Wood in contact with salt sea water** (ocean), use class 5, high retention and penetration through sapwood needed (NWPC class M)
- **Wood in ground contact** or high exposure, use class 4
 - Poles, needs of high content of preservative and penetration through the sapwood (NWPC class A, NWPC class A poles, Fence posts)
- **Wood exposure to weather and rain**, use class 3.2
 - Decking, balconies, fences, non-covered terraces (NWPC class AB)
- **Wood exposure to short period of wetting and rain**, use class 3.1
 - Cladding, covered decking (NWPC class AB, or coated wood having low water permeability)
- **Wood exposed to occasional high humidity**, use class 2
 - Wood in high humidity, surface treatments mainly against mould and bluestain
- **Wood in dry conditions**, covered, use class 1
 - Only occasional attack of insect expected, surface treatment against insects and termite, depending on use conditions

Examples of end-uses for preservative-treated wood

Use class according EN 335	Service conditions	Example	Recommended wood protection class
1	Interior timbers in dry conditions.	Furniture, interior cladding	1)
2	Wood above ground and under cover and fully protected from the weather, but where high environmental humidity can lead to occasional but not persistent wetting.	Roof trusses, exterior timbers under cover	1)
3	Wood above ground and either continually exposed to the weather or subject to frequent wetting; where it is relatively easy to replace damaged components and where the consequences of failure will be moderate.	3.1 External joinery, such as windows, doors etc. 3.2 External cladding, garden timbers	B, GW, HW AB, GRAN, HC
4	Wood in contact with the ground or fresh water or severely exposed to the weather; or if a wood component is inaccessible, or where the consequences of failure will be particularly serious.	Transmission poles, railway sleepers, fence posts, bridges	A A pole A mod
5	Wood constructions in sea water ²⁾ and constructions subject to extreme conditions or where there are special durability and strengths requirements.	Wharf timbers, jet-ties, piles	M M mod
1) Preservative-treated wood normally not necessary to use in these use classes 2) Salinity > 0,6%			

The wood preservative penetration and retention requirements for each protection class, pine heartwood.

HW "window components", HC "exterior cladding"

(NWPC Doc 1 part 3, 2017)

NTR Class	Treatment requirement		
	Penetration class	Analytical zone	Retention of wood preservative
HW	NP 1: No requirement on penetration, cf. EN351-1: 2006	Outer 3 mm	According to the NWPC requirement in the analytical zone, NTR Doc. 2 part 3
HC			

Wood protection class	Nordic quality marking	Colour code
NTR HW		Brown
NTR HC		Orange

Marking the products according to NWPC

Marking of the protected wood according to NWPC, wood species: Pine

Wood protection class	NWPC quality mark
NTR M	
NTR A	
NTR A pole	
NTR AB	
NTR B	

- NTR M: wood in marine salt water
- NTR A: wood in ground and water contact
- NTR A_{pole}: wood pole in ground and water
- NTR AB: wood above ground contact
- NTR B: wood above ground contact , windows and doors

The wood preservative penetration and retention requirements for each protection class, chemically modified wood.

(NWPC Doc 1 part 4, 2017)

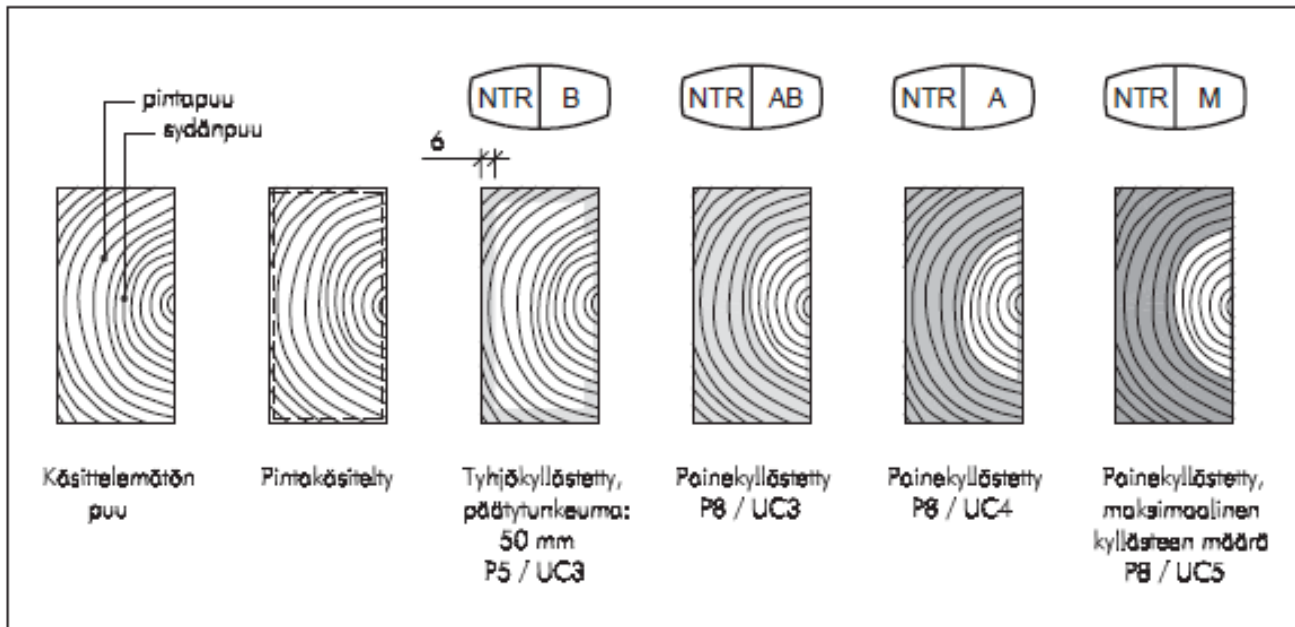
NTR Class	Treatment requirement	
	Penetration class	Retention of wood preservative
B mod	NP 3 Minimum 6 mm lateral penetration into the sapwood	According to the NWPC requirement in the analytical zone, NTR Doc. 2 part 4
AB mod A mod M mod	NP 5: Full sapwood penetration, cf. EN351-1	

Wood protection class	NWPC quality mark	Bundle/package marking
NTR M mod		Blue
NTR A mod		White
NTR AB mod		Yellow
NTR B mod		Red

Marking the products according to NWPC

Kyllästetyn puun luokitus:

NTR, Pohjoismaiden puunsuojausneuvosto (RT 21-10880)



M valtameret
A maakosketus
AB maan pinnan
yläpuolinen puu
B ikkunat ja ovet
(harvoin käytössä)

Pintakäsittely esim.
julkisivut (kuusi)

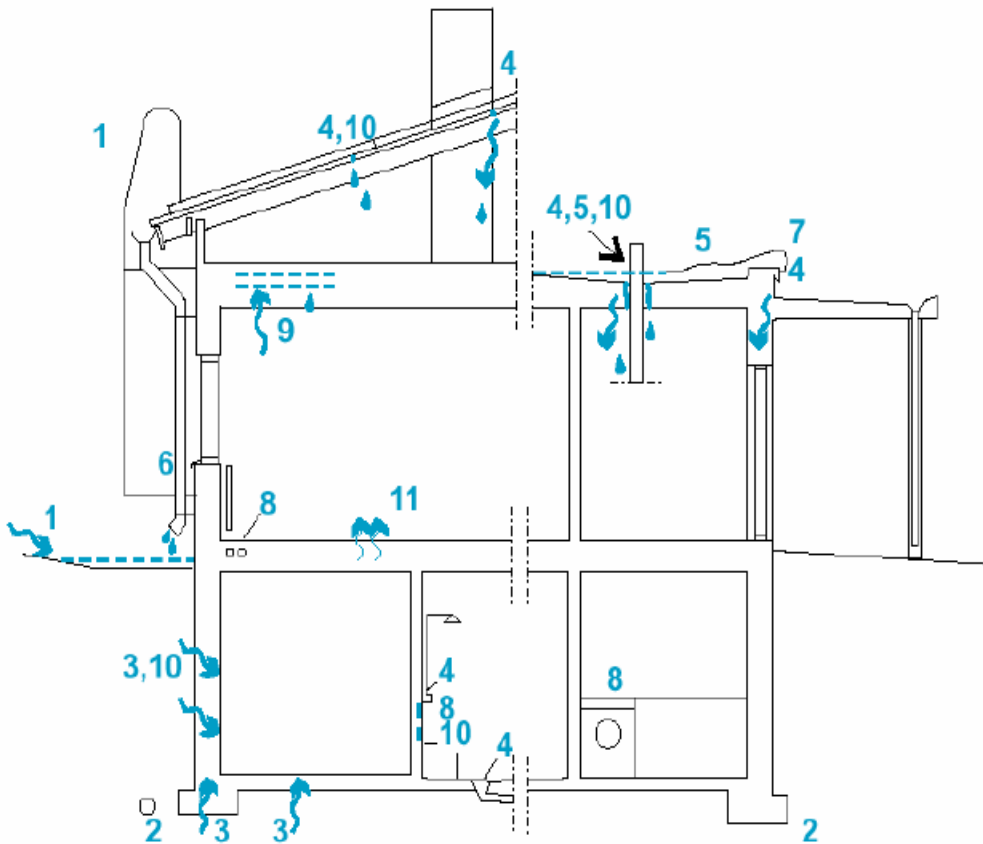
Paine-kyllästyksessä (luokat AB, A ja M) kylläste tunkeutuu männyn pintapuuhun mutta ei sydänpuuhun. Kyllästeen vaadittava pitoisuus riippuu luokasta ja aineesta .
Vaadittavan pitoisuuden määrää **NTR** tutkimusten pohjalta.

Pintakäsittelyt

- **Maalityyppi ja käsittely-yhdistelmät**, vesipohjaiset / öljypohjaiset, värin pysyvyys, läpäisevyys
- **Ilmansuunta**, rakennuksen sijainti ja ympäristön altistavuus
- **Seinän korkeus / räystäät** (puukerrostalo, merkitys vähenee), sokkelin korkeus
- **Suojapellitykset** ja niiden asennus / huolto
- **Haluttu ulkonäkö** ja kunto: vaatimukset (öljymaalit: värisävy muuttuu pinnan vanhetessa)
- **Työn suoritus**: sääsuojat, puhdistus, esikäsittelyt, pinnoitteet, kustannukset <-> huolellisuus
- **Hyvin tehty** säästää - omistajan olisi huomioitava kustannukset etukäteen -> elinkaarisäästöt
- **Julkisivun vaihto** ajoittain (uusintakäsittelyn / vaihdon kustannukset)
 - Julkisivun vaihdettavuus (kiinnikkeet, runkorakenteet).

Puun pintakäsittelysteemejä

Maalityyppi	Kalvon muodostus, suojaa auringonvalolta	Veden läpäisevyys	Huom
Puuöljyt	Ei kalvoa, suojaa huonosti valolta	Suuri	Sääalttiita, vaativat mm. home-suoja-aineen, uusintaan eivät peittomaalit
Lietemaalit, Punamulta	Ei varsinaista kalvoa, mutta suojaa puuta valolta	Suuri	Maalityypin vaihto ei suositeltavaa, uusintakäsittely 6 - 12 v, helppo,
Pigmentoitu puunsuoja, vesiohen	Suojaa puuta valolta rajatusti	Suuri-kohtalainen	Uusintakäsittely 5 - 9 v, helppo, vesiohenteiset maalit, Kunto !
Pigmentoitu puunsuoja, liuteoh.	Suojaa puuta valolta rajatusti	Suuri-kohtalainen	Uusintakäsittely 5 - 9 v, helppo, liuotinohenteiset maalit, Kunto!
Peittävä puunsuoja ("extrat")	Suojaa puuta valolta rajatusti	Kohtalainen	Uusintakäsittely 6 - 12 v, liuotinohenteiset maalit, pinnan kunto !
Dispersiomaalit ("lateksit")	Suojaa puuta valolta hyvin	Kohtalainen - tiivis	Hyvä pohjustus tarpeen, Uusintakäsittely 10 - 18 v, puhdistus väri säilyy hyvin
Alkydiöljymaalit	Suojaa puuta valolta hyvin	Pieni (tiivis maalikalvo)	Uusintakäsittely 10 - 18 v, puhdistus väri muuttuu iän mukana
Öljymaalit	Suojaa puuta valolta hyvin	Pieni (tiivis maalikalvo) uusi	Uusintakäsittely 10 - 18, v, puhdistus väri muuttuu iän mukana



- 1 sade, lumi, jää, katto- ja valumavedet
- 2 salaojien puuttuminen tai puutteellinen toiminta
- 3 maakosteus
- 4 läpivientien, kiinnitysten ja liittymien vuodot
- 5 puutteellinen lämmöneristys, kosteuden kondensoituminen
- 6 syöksytorvien ja pellitysten vuodot
- 7 räystäiden vuodot
- 8 putkivuodot, laitevauriot
- 9 sisäilman vuodot, konvektio ja kosteuden kondensoituminen
- 10 vedeneristysten vuodot
- 11 rakennuskosteus

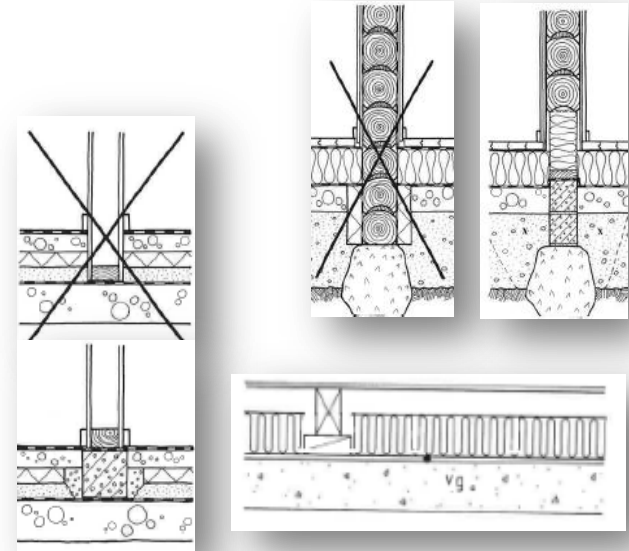
Kosteus-, home ja laho- ongelmien kannalta kriittiset rakenneosat

Yleisiä rakennuksen kosteuden
lähteitä ja vaurioriskejä

Kosteudelle alttiit rakenteet
RT 80-10712

Kosteus- home- ja laho-ongelmien historiaa

- Suomessa sienten aiheuttamat ongelmat tulivat laajempaan tietoon jo 1970 luvulla → lattiasienien aiheuttamat ongelmat laajoja lattioissa ja seinien alaosissa (Luotonen et al 1980, Viitanen 1986, **lahovaurioiden korjausohjeet** VTT 1980 →).
- **Silloiset ratkaisut eivät täytäneet homekorjausten vaatimuksia?**
- **-> VTT kehitti homeen ja lahon kehittymismallit**
- Ruotsissa mm. eristämättömälle betonilaataalle koolatut puulattiat ja kellareiden virheelliset sisäpuoliset eristykset aiheuttivat ongelmia, joista homekeskustelut lähtivät Ruotsissa 1970-luvulla liikkeelle (Samuelson 1985).
- Ryömintätilaiset lattiat ovat kautta aikojen tuottaneet ongelmia etenkin kostea maapohjan, puutteellisen ilmanvaihdon sekä hallitsemattomien ilmavuotojen (hajujen) vuoksi.
- Edelleen tulee esiin vakavia vaurioita



*Laurinkoski / M. Eklund 2013:
→ Vauriot uusiutuneet kahden vuoden
kuluttua korjauksesta.*

VTT:n kokemukset: vaurioiden ja ongelmien syitä

- **Ympäristöstä tuleva vesi** eri muodoissaan: kattovuodot, ulkopintojen vesivuodot, maakosteus ja pohjavesi, valumavesi rakenteisiin jne...
- **Putki – ja käyttöveden vuodot**, sisäilman korkea kosteus ja kylmäsillat, sisäilman vuotovirtaus ja kosteuden kondensoituminen rakenteisiin, puutteellinen tai toimimaton ilmanvaihto....
- **Kosteudelle alttiit rakenteet**, väärin suunnitellut ja toteutetut veden poiston ja eristyksen ratkaisut, veden kertymä, puutteellinen maapohjan kuivaus...
- **Huolimaton korjaus**: vakavammat viat jääneet korjaamatta, virheelliset rakenne- ja materiaaliratkaisut , materiaalien ja rakenteiden kastuminen rakennusvaiheessa, läpiviennit vuotavat ilmaa, putki- ja vesivuotojen puutteellinen korjaus, kuivaus ja jälkihuolto jääneet tekemättä, kosteuseristykset jääneet korjaamatta jne....
- **Huollon puute tai virheet**, laitevuoto, huolimaton vedenkäyttö, liiallinen sisäilman kosteus, puutteellinen ilmanvaihdon huolto, vesivuotoon ei reagoida....

HUOM! Rakennusten hyvä lämmöneristystaso ei ole syy kosteusongelmiin, mikään rakenne ei kestä vesivuotoja....

Pinnoilla näkyvät viitteet mahdollisista kosteus- ja homeongelmista



Vesikatteen alapintaan kohdistuu syksyisin ja talvisin lähes aina tiivistynyttä kosteutta. Seurauksena on eri asteista mikrobi- ja homekasvua.

Ilmiö on yleinen Suomen rakennuksissa ja usein ”normaali” ulkoilman olosuhteista johtuva ilmiö.

Ongelmat rajoittuvat yleensä ullakotilaan - > ulkoilmaan yhteydessä oleva rakenne -> ullakotilan **liian runsas tuulettaminen** lisää ulkoilmasta tulevaa kosteuskuormaa.



Säälle alttiit suojaamattomat ja pinnoittamattomat puurakenteet harmaantuvat veden, auringonvalon sekä home- ja sinistäjäsiementen vaikutuksesta.

Sama ilmiö tapahtuu pitkään ulkona kuivatussa puutavarassa. Tämä on tyypillinen ilmiö ja tällaista puuta on vuosisatojen aikana käytetty rakentamisessa.



Puumateriaali vioittuu, kun siihen kertyy vettä rakenteellisten vikojen seurauksena

- **Ensi vaiheessa** tulevat sinistäjä- ja homesienet, myöhemmin myös laho- ja hyönteisvial
- **Vesi kertyy** rakenteellisiin yksityiskohtiin, joissa kosteus voi viipyä pitkään aiheuttaen erilaista vikaa kosteuden vaikutusajasta ja lämpötilasta riippuen



Homeet ja mikrobit ovat osa luontoa

- **Puun pinta harmaantuu** veden, auringonvalon ja sienten yhteisvaikutuksesta (ulkopinnat ja -rakenteet)
- Ulkopinnan vähäiset homepisteet eivät yleensä ongelma
- **Kosteusongelmat**, -vial ja -vauriot johtuvat veden pääsystä rakenteisiin tai pitkäaikaisesta kosteusrasituksesta -> vika / vaurio
- **Runsas homekasvu** ongelma: ulkonäkö, terveys -> korkea ja pitkäaikainen kosteus johtaa usein myös lahovikaan / -vaurioon



Rakenteellisen suojauksen ja pitkäaikaiskestävyyden raja-arvot

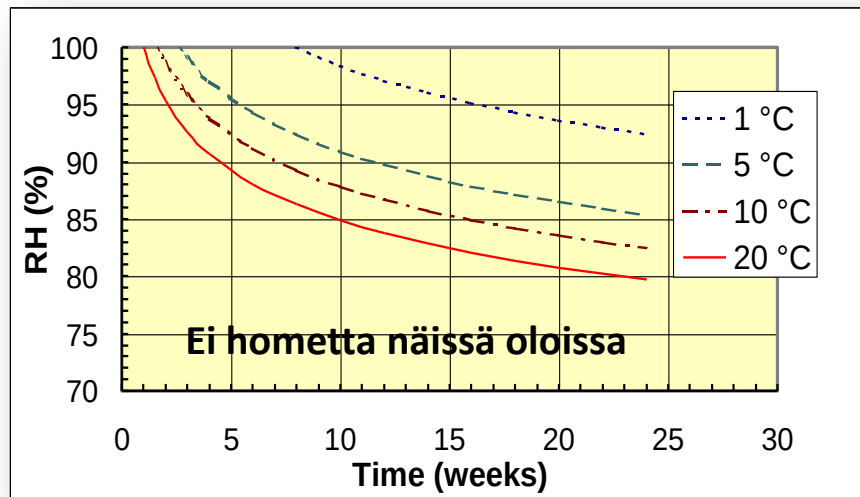
- **Rakenteellisen suojauksen** kriittisinä arvoina voidaan käyttää esim. puun homehtumisen ja lahoamisen osalta esitettyjä kosteuden, lämpötilan ja niiden vaikutusajan kriittisiä suureita.
- **Kosteuden osalta ei voida antaa ainoastaan yhtä arvoa, koska kosteus vaikuttaa yhdessä lämpötilan ja vaikutusajan kanssa.**
- **Puumateriaalin huokosilman** kosteus ei saisi ylittää seuraavissa kuvissa esitettyjä raja-arvotiloja rakenteissa tai pinnoitteen alla.
- **Raja-arvoihin vaikuttavat: kyllästeet, modifiointi-käsittelyt, pintakäsittelyt**



Puun säilymisen kannalta tärkeää ovat kosteus, lämpötila ja niiden vaikutusaika

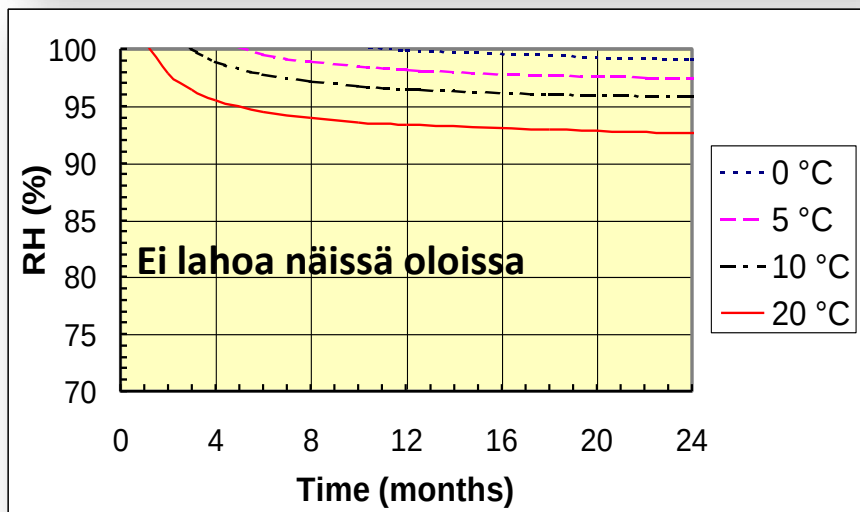
Homeelle

kriittiset
olosuhteet
(kasvun alkuun
kuluva aika
viikkoina)



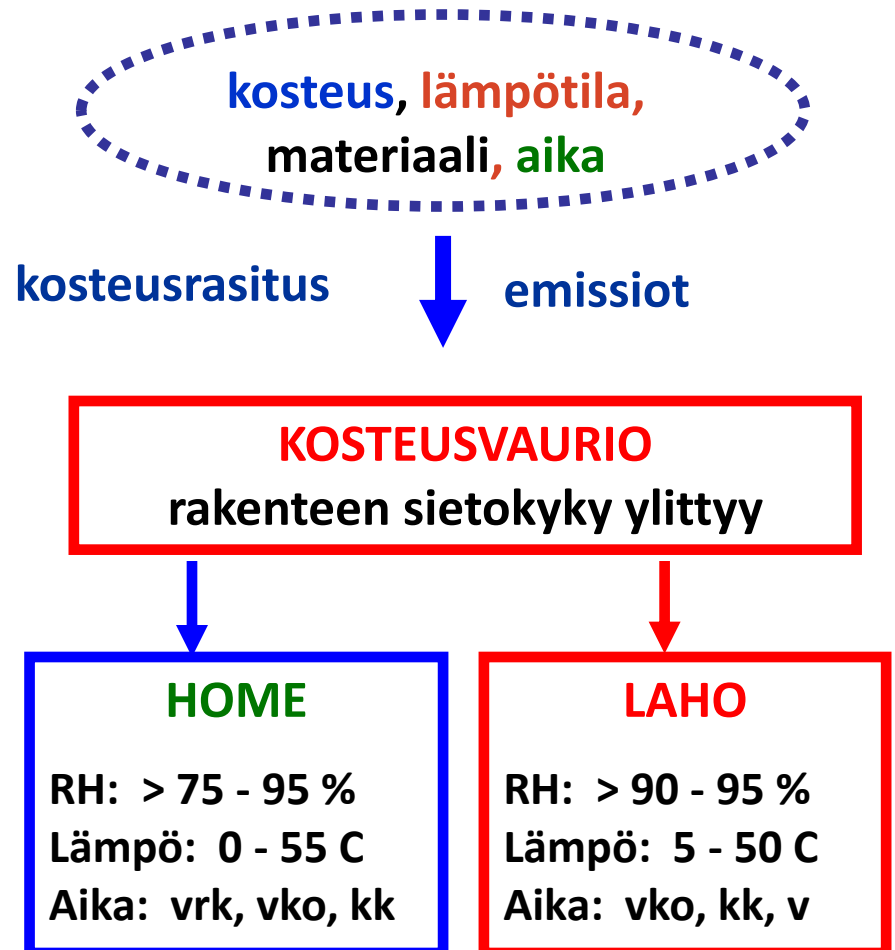
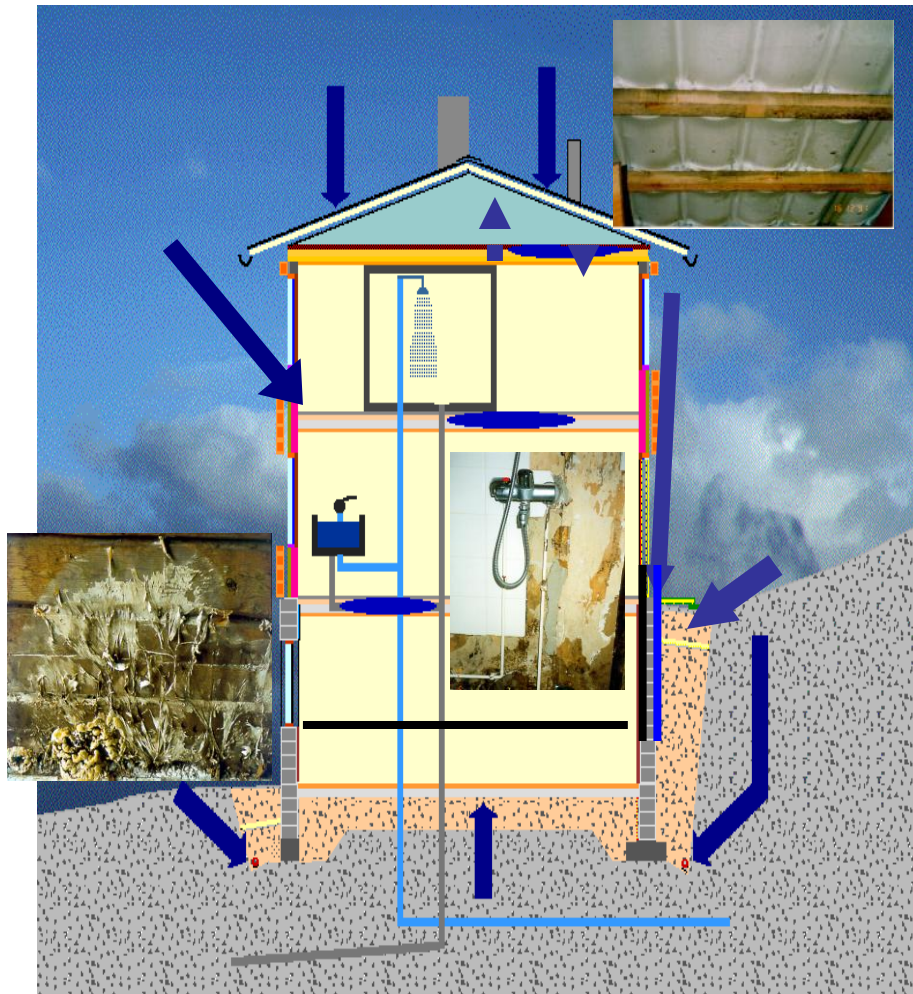
Sama

laholle
(kuukausina)



Vettä ja ongelmia voi tulla rakennuksiin eri tavoin

Rakennuksiin kohdistuu erilaisia kosteusrasituksia, joiden vaikutus rakenteiden ja materiaalien kestävyysasteen vaihtelee.



Materiaalien ympäröivään ilmaan rajoittuvien pintojen homehtuminen

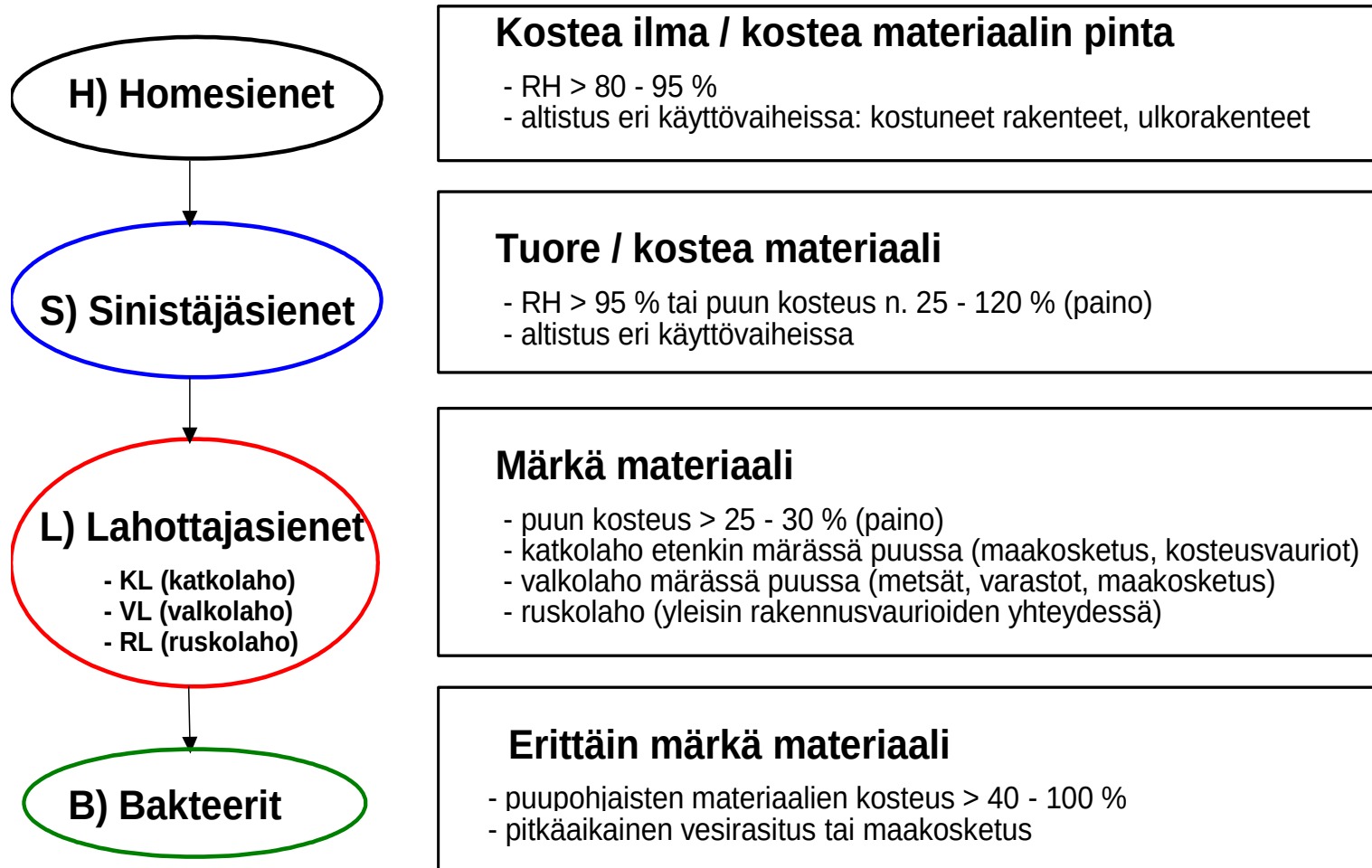
- Materiaalien ominaisuudet
- Pinnoitteet
- Ympäröivän ilman kosteus- ja lämpötila
- Vaikutusaika
- Pintaan kertyvät muut aineet, esim orgaaninen lika
- Homeen kasvun arviointi homeindeksillä
 - Tyypillinen menetelmä materiaalien homeenkesto-ominaisuuksien arvioinnissa

Materiaalien homehtuminen ja lahoaminen

- **Suojaamattomat** puu- ja paperipohjaiset materiaalit herkkiä home- ja mikrobikasvulle, kun kosteutta on riittävästi (RH yli 80 – 90 %), lahoaminen mahdollista, kun kosteus pitkään yli RH 95 – 98 %
- Pintaan kertynyt **orgaaninen lika** herkistää pinnan homekasvulle (RH jatkuvasti tai pitkäaikaisesti yli 75 % ja lämpötila 20 – 50 °C)
- **Puun kestävyys** vaikuttavat tekijät
 - Useat tekijät vaikuttavat samanaikaisesti
 - Pintakäsittely merkittävä suojausmenetelmä
 - Puun homehtumisalttius vaihtelee
 - Suojaamaton puu harmaantuu ulkona sään vaikutuksesta, normaali ilmiö
- **Betonin pinnan** homehtuminen vaihtelee
 - Lika ja pinnan karbonatisoituminen lisää homeherkkyyttä
- **Betonin sisäosa** kestää hyvin hometta - ei homehdu
- **Materiaalien yhdistelmät** – homehtumisherkkyys riippuu herkimmästä materiaalista
- **Lahoaminen** on mahdollista, kun puun kosteus on pitkään (kk / vuosia) korkea, puun kosteus yli 25 – 30 %.

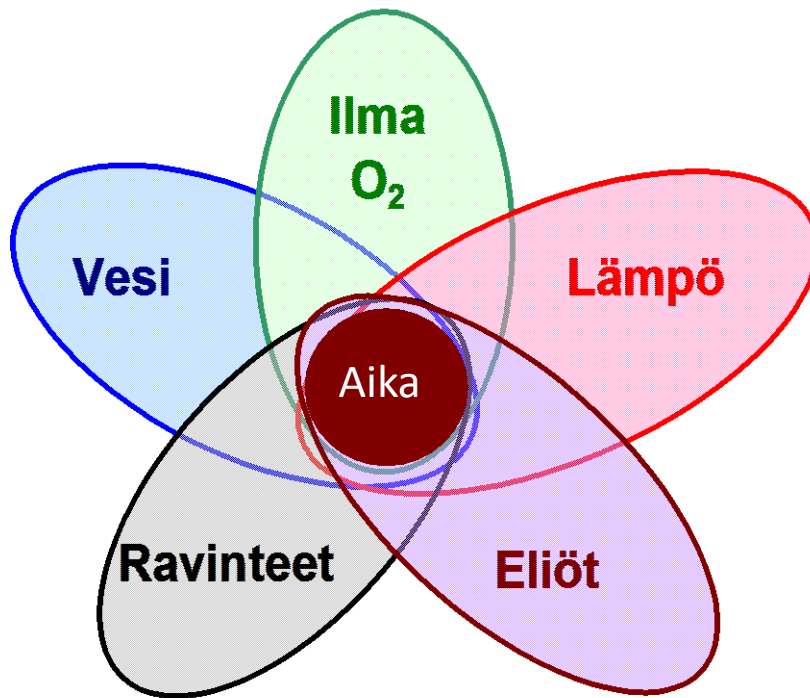
Mikrobien kasvu kosteissa rakennusmateriaaleissa

Rakennusmateriaalien mikrobiongelmat / -vauriot



Mikrobien ja homeiden biologiaa

Eliöiden kasvun mahdollistavat rajaolot mikroilmastossa



Pinnan tai materiaalin mikroilman suhteellinen kosteus (RH) ja veden aktiivisuus ($a_w = \text{noin } RH / 100$):

- Home > RH 75 - 80 % (>95 %)
- Laho > RH 95 %
- Hyönteiset > RH 65 - 80 %

Esim. puun kosteus, u (paino %):

- Home > u 18 – 20 %
- Laho > u 25 – 30 %

Lämpötila (-5) .. + 50 °C

Homeen kasvun mallintaminen on työkalu kosteusfysikaalisille toimivuusmalleille käytettäväksi erilaisten rakenteiden toimivuuden arvioimiseksi. Homeen mallintamisen tekijät:

1. Homehtumiselle **suotuisat** kasvuolosuhteet
 - kasvualusta (materiaali, ravinteet)
 - lämpötila, suhteellinen kosteus, vaikutusaika
2. Homeen **kasvunopeus** eri olosuhteissa
 - olosuhteet
 - kasvualusta
 - hometaso
 - mahdolliset viiveet kasvun alkamisessa
3. Homekasvun **maksimitaso** vallitsevissa olosuhteissa
 - kasvun hidastuminen maksimihometason lähellä
 - materiaaliriippuvuus
4. Homeindeksin **muutos** kasvuolosuhteiden ulkopuolella
 - lyhyet ja pitkät syklit (< viikko/ vuodenaikataso)

Homekasvun osoittaminen indeksimenettelyllä (VTT)

Homeindeksi puulle

0 = ei kasvua

1 = alkava kasvu (mikroskopia)

2 = kohtalainen kasvu (mikroskopia)
peitto > 10 %)

3 = alkava silmin havaittava kasvu
(runsas kasvu mikroskopia)

4 = näkyvä kasvu > 10 – 25 %
(runsas mikrosk. kasvu)

5 = näkyvä kasvu > 50 %

6 = runsas kasvu n. 100 %

Muu materiaali

0 = ei kasvua

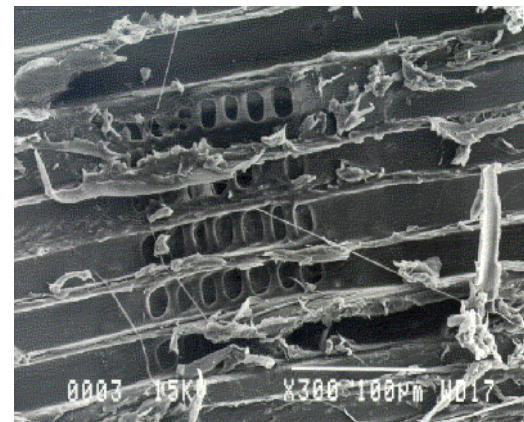
1 = alkava kasvu

2 = kohtalainen kasvu
peitto > 10 %)

3 = peitto < 50 %
(mikroskopia)

4 = peitto > 50 %
(mikrosk. kasvu)

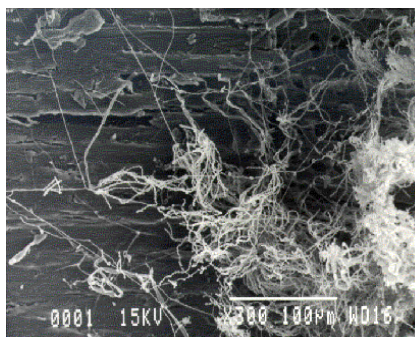
5 = runsas kasvu
(kasvu näkyy
mikroskoopilla)



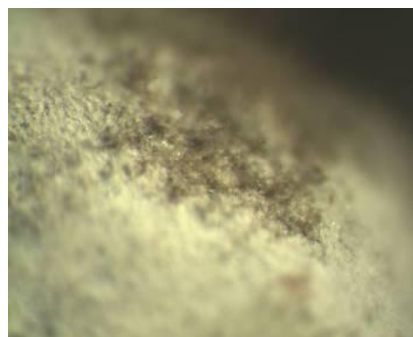
Indeksi 1 (kasvun alku, puu



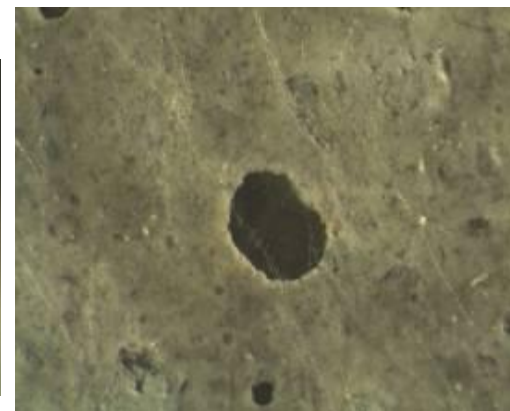
Indeksi 6, puu



Indeksi 4, puu,

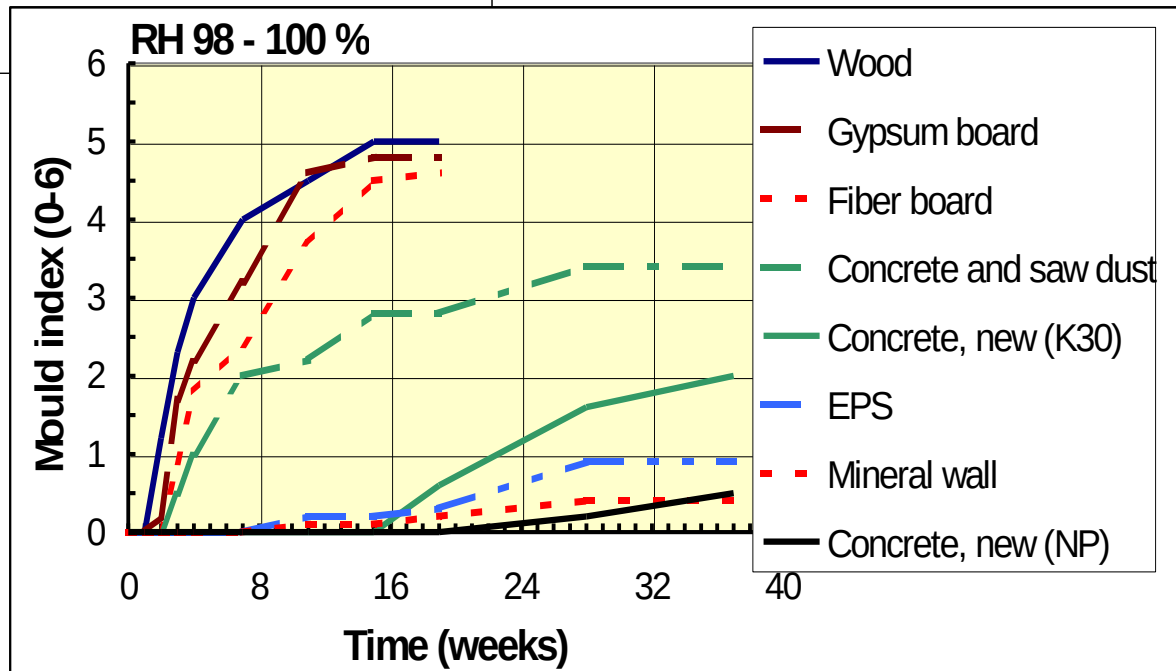
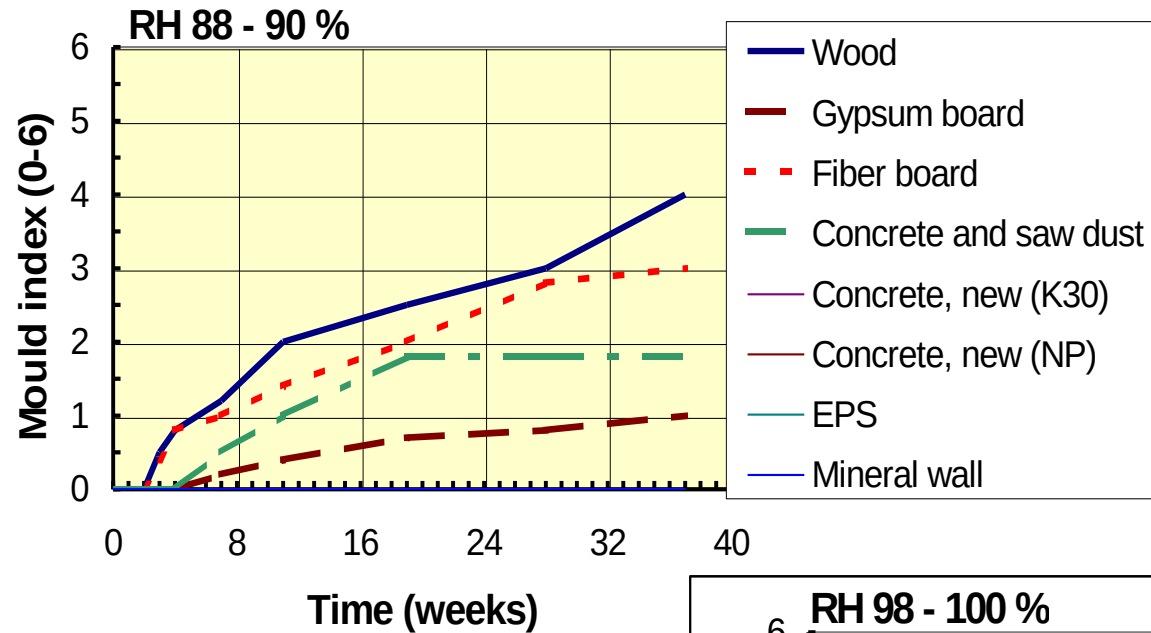


Indeksi 3 - 4, betoni



Indeksi 2 (betoni)

Mould growth on different building materials at RH 88 - 90 % and RH 98 – 100 % (Viitanen 2004)



VTT:n kehittämä homemalli puulle (Viitanen et.al.)

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02)} k_1 k_2$$

Regressiomalli
laboratoriokokeiden
pohjalta

Itäminen ja kasvu

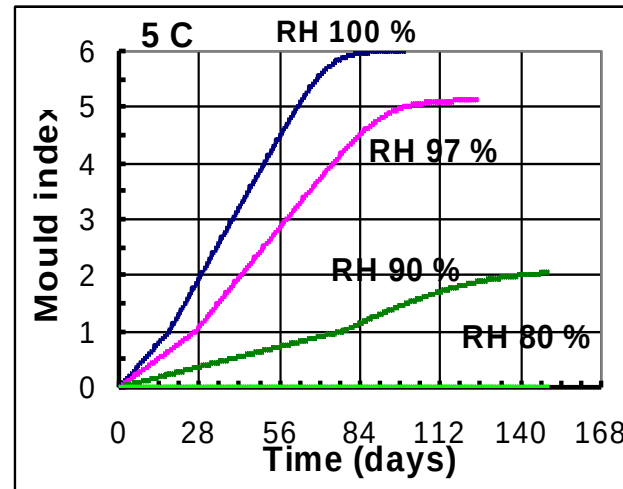
$$k_1 = \begin{cases} 1, & \text{when } M < 1 \\ \frac{2}{\frac{t_v}{t_m} - 1}, & \text{when } M > 1 \end{cases}$$

Kasvun taantuma

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0.032, & \text{when } t - t_1 \leq 6 \text{ h} \\ 0, & \text{when } 6 \text{ h} \leq t - t_1 \leq 24 \text{ h} \\ -0.016, & \text{when } t - t_1 > 24 \text{ h} \end{cases}$$

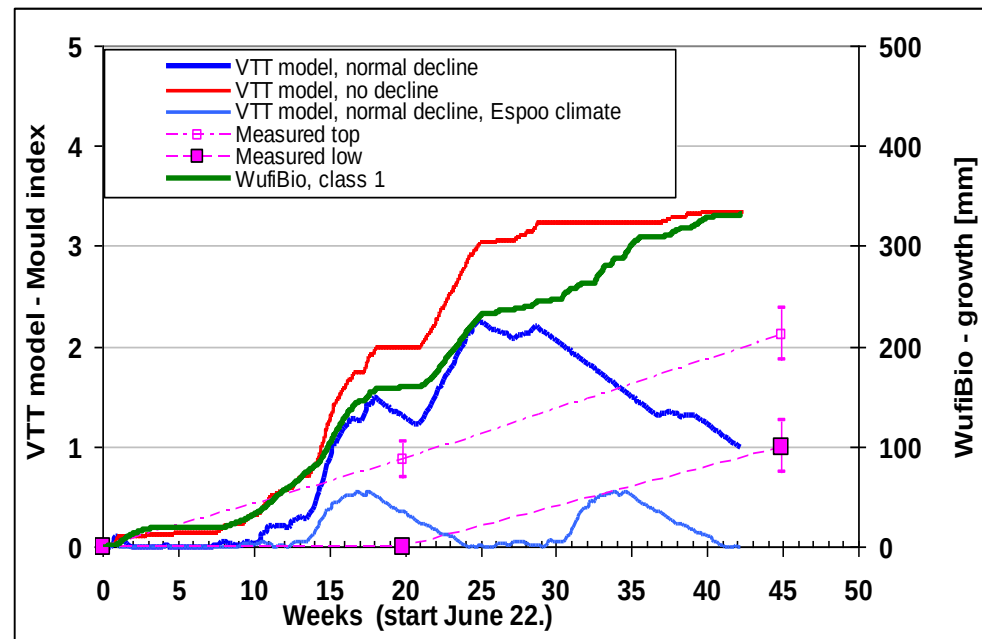
Kasvun hidastuminen

$$k_2 = \max[1 - \exp[2.3 \cdot (M - M_{\max})], 0]$$

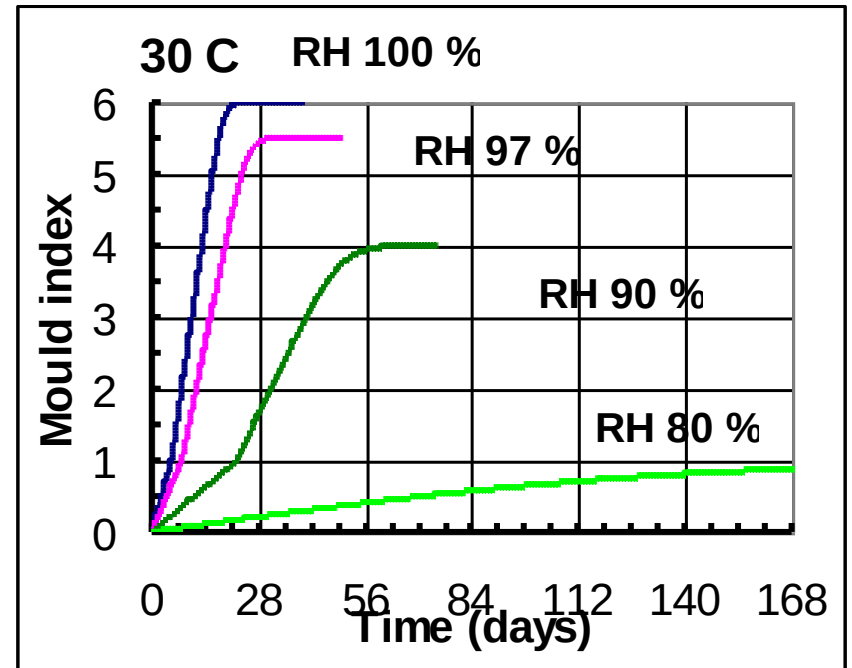
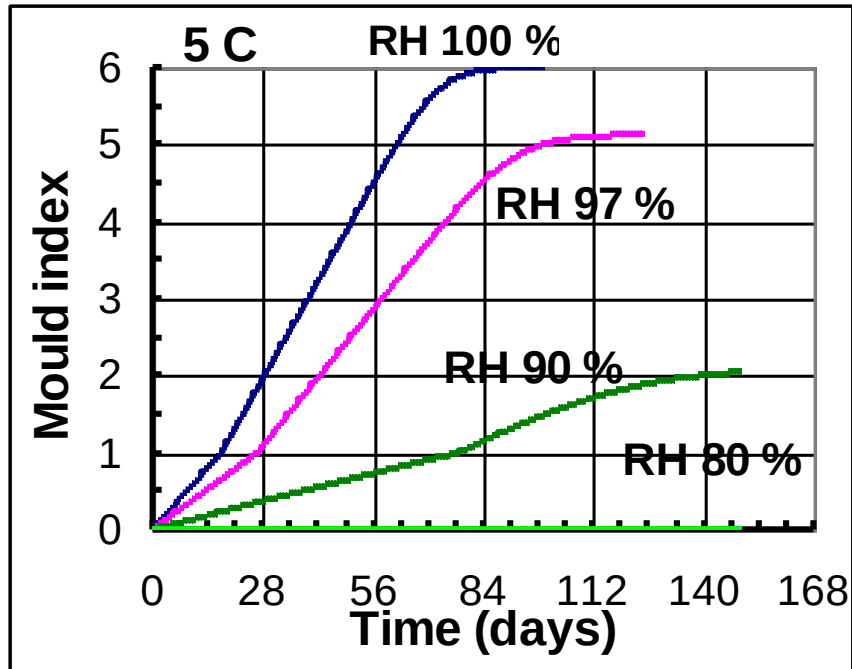


Miksi hometason muutokset kasvualueen ulkopuolella on tunnettava

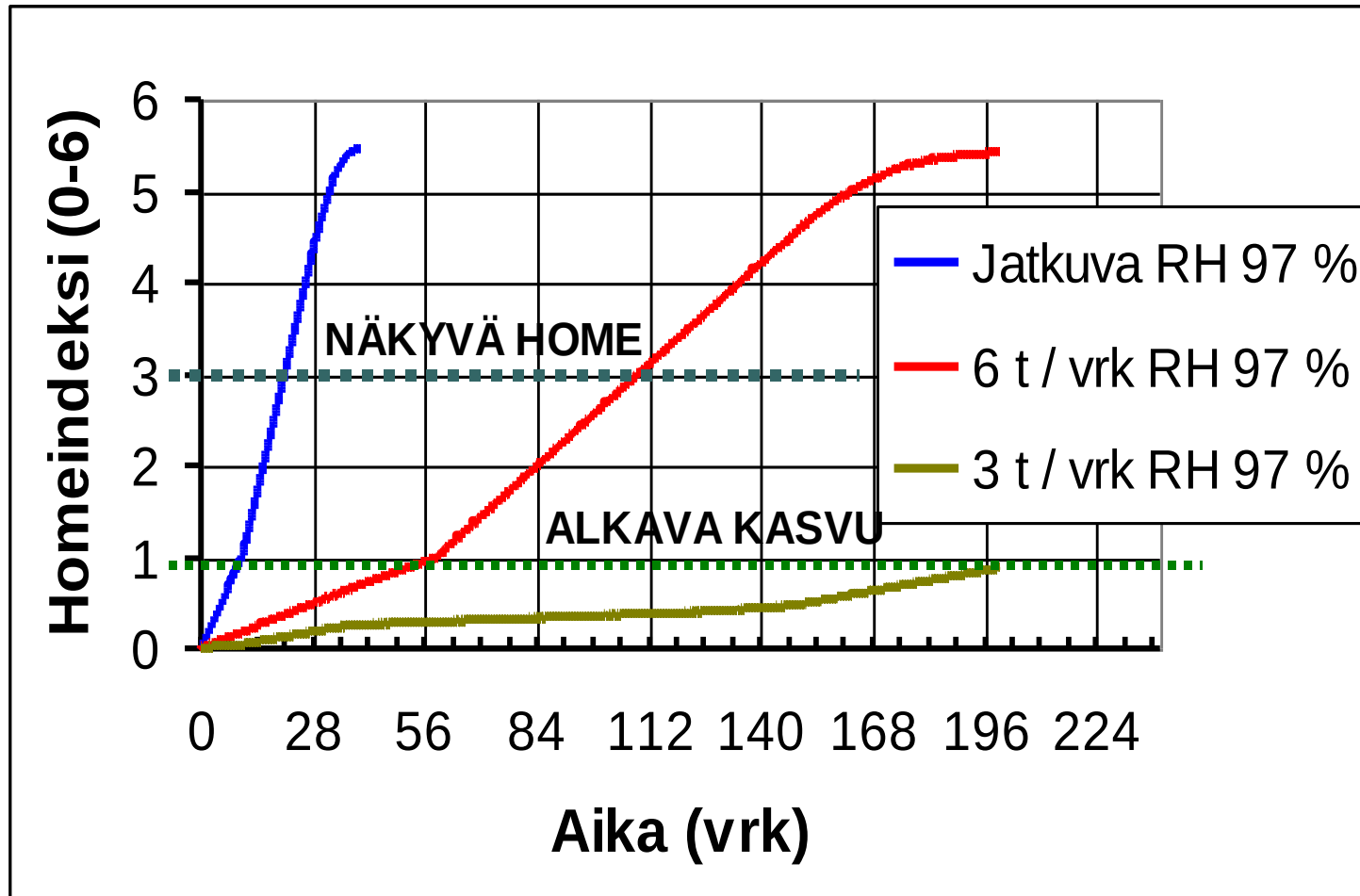
- Home ei itsestään poistu materiaaalipinnalta, vaikka sen kasvuolosuhteet muuttuvat epäedullisiksi
- Homeen aktiivisuus muuttuu ja sen kasvua kuvaava taso (homeindeksi [0,6]) voi alentua
- Homeen kasvun uudelleen käynnistyminen, kasvun alkutaso ja kasvunopeus ovat merkittäviä tekijöitä
- Homekasvun kumuloituminen mallissa voi johtaa liioiteltuun riskiin vaihtelevissa oloissa
- Käytännössä rakenteiden olosuhteet vaihtelevat jatkuvasti.



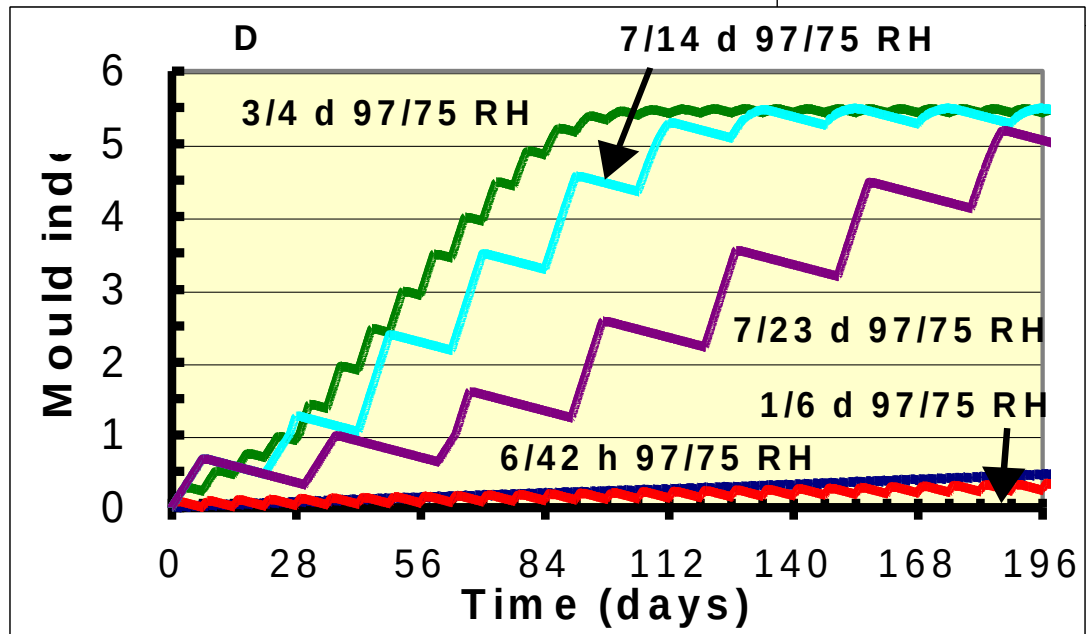
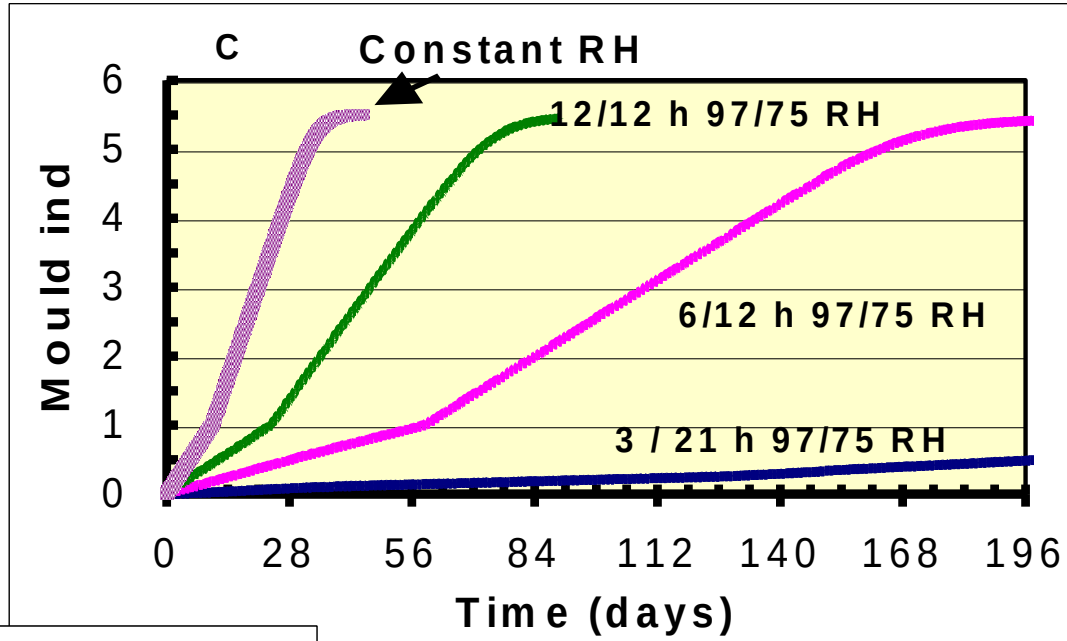
Homeen kasvuennuste eri kosteusoloissa 5 ja 30 °C lämpötiloissa, puumateriaali



Homeen kasvuriski riippuu vaikutusajasta



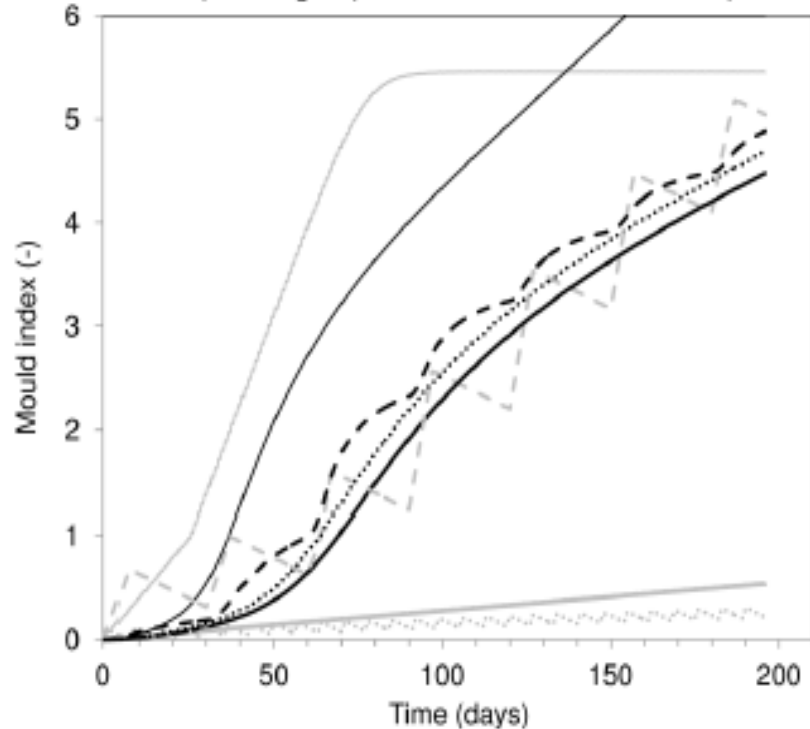
Homeen kasvun ennuste
 männyn pintapuussa
 vaihtelevissa kosteusoloissa
 kosteus välillä RH 97 % - 75 %
 (Viitanen et al 2000)



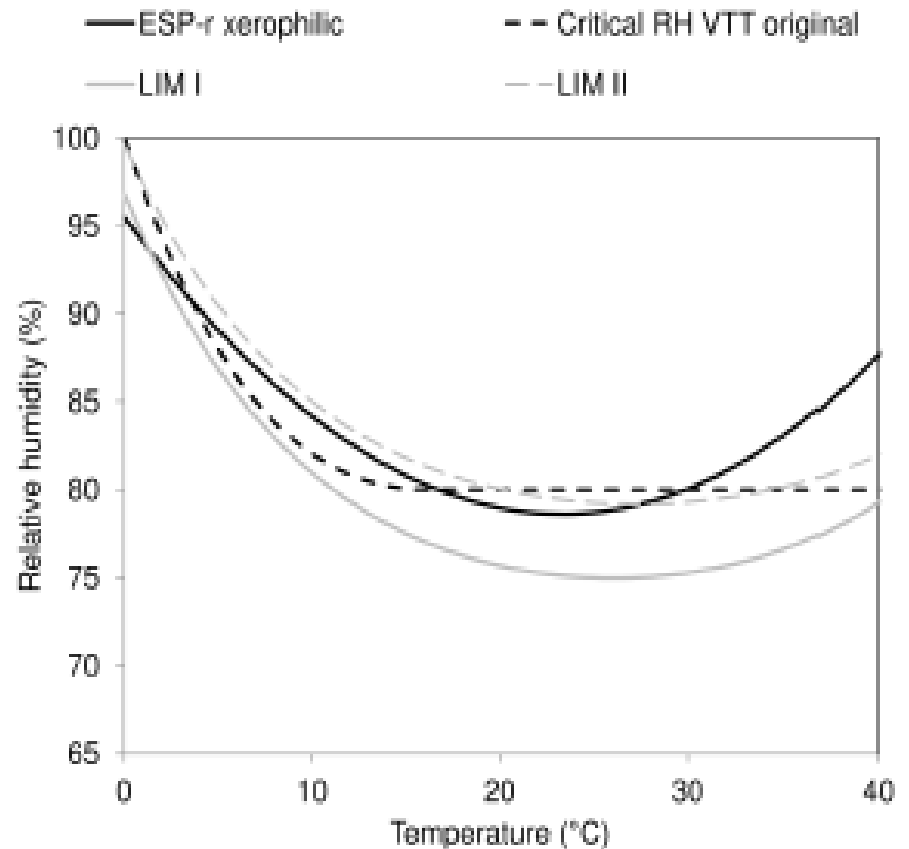
Homeen kasvua kuvaavia malleja: mm. VTT mould ja FuFiBio

(Vereecken and Roels 2012)

- 3h 97% - 21h 75% (VTT original)
- 12h 97% - 12h 75% (VTT original)
- 1d 97% - 6d 75% (VTT original)
- - 7d 97% - 23d 75% (VTT original)
- 3h 97% - 21h 75% (WUFI-Bio class I)
- 12h 97% - 12h 75% (WUFI-Bio class I)
- 1d 97% - 6d 75% (WUFI-Bio class I)
- - 7d 97% - 23d 75% (WUFI-Bio class I)



VTT / FuFiBio / isopleths model



Onset of mould growth in Sweden (Häglund et al 2010)

The model for evaluating onset of mould growth is adopted from Isaksson et al. (2010) and presented in a summary manner below.

The output from the model is expressed in form of a daily dose D which is a function of daily average values of relative humidity ϕ and temperature T , see Eq. (1):

The output from the model is expressed in form of a daily dose D which is a function of daily average values of relative humidity ϕ and temperature T , see Eq. (1):

$$D = D_\phi(\phi) \cdot D_T(T) \quad (1)$$

where $D_\phi(\phi)$ and $D_T(T)$ represents partial doses (indices self-explanatory). After n days of exposure in a varying climate the dose $D(n)$ is equal to the sum of every daily dose D_i :

$$D(n) = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n D_\phi(\phi_i) \cdot D_T(T_i) \quad (2)$$

This form of function makes it possible to evaluate the risk of mould growth for an arbitrary daily variation of relative humidity and temperature. In Viitanen (1997) the critical time t_{m0} for onset of mould growth, here defined as "some growth detected with microscope (traces)", for *resawn spruce sapwood* at constant climate condition was found to be:

$$t_{m0}(\phi, T) = e^{-0.74 \ln T - 15.53 \ln \phi + 75.736} \quad (3)$$

$$D_{rel} = D / t_{m0,ref} = D_{\phi,j} D_{T,j} / (t_{m0,j} D_{\phi,j} D_{T,j}) = 1 / t_{m0} \Rightarrow$$

$$D_{rel}(n) = \begin{cases} 0 & \text{if } D_{rel}(n) \geq 0 \text{ for any } n \\ \sum_{day=1}^n D_{rel,day} = \sum_{day=1}^n \frac{1}{t_{m0,day}(\phi, T)} & \begin{cases} < 1 & \text{no onset} \\ \geq 1 & \text{onset of mould} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

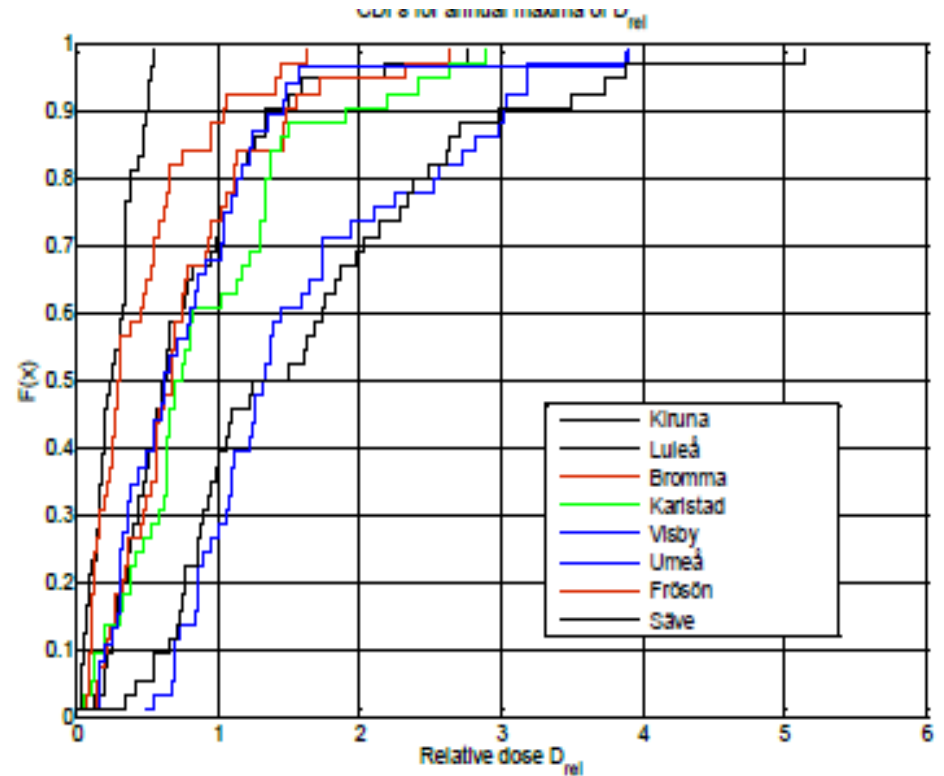
where

$$D_{rel,anyday} \text{ is adjusted if } D_{rel}(anyday) < 0 \text{ to set } D_{rel}(anyday) = \sum_{day=1}^{anyday} D_{rel,day} = 0$$

Note that the total accumulated relative dose may never be negative since $D_{rel}(n) = 0$ represents the lowest possible state. In case the relative humidity or temperature falls out of valid range, Eq. (3) needs to be modified in order to consider e.g. recovery due to low temperatures and dry air:

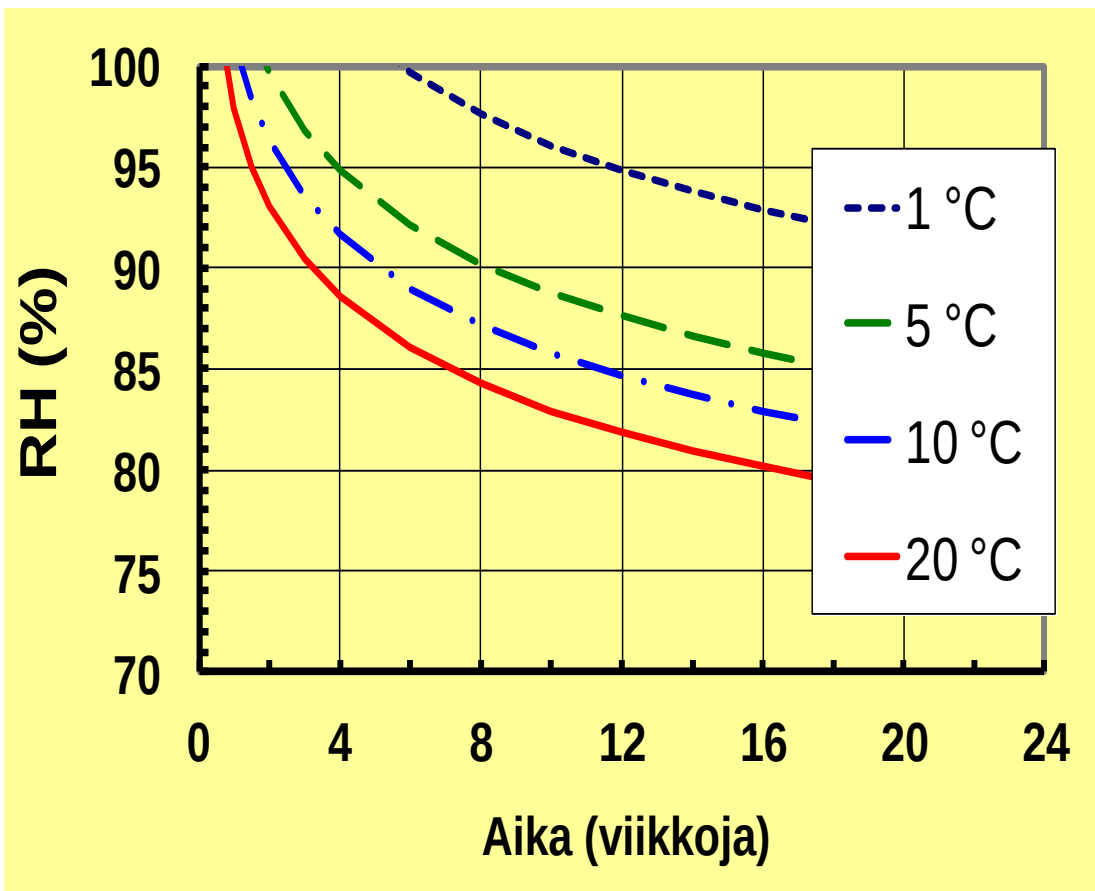
$$t_{m0}(\phi, T) = \begin{cases} e^{-0.74 \ln T - 15.53 \ln \phi + 75.736} & \text{if } \begin{cases} 75 \leq \phi \leq 100\%, 0.1 \leq T \leq 30^\circ \text{C} \\ 60 \leq \phi < 75\%, 0.1 \leq T \leq 30^\circ \text{C} \\ \phi < 60\%, 0.1 \leq T \leq 30^\circ \text{C} \\ T < 0.1^\circ \text{C} \end{cases} \\ (k(\phi - 60) - 0.5)^{-1} e^{-0.74 \ln T - 15.53 \ln 90 + 75.736} & \\ -2e^{-0.74 \ln T - 15.53 \ln 90 + 75.736} & \\ -2e^{-0.74 \ln 20 - 15.53 \ln 90 + 75.736} & \end{cases} \quad (5)$$

and $k = 15^{-1}(e^{15.53 \ln(75/90)} + 0.5)$



Regressiomalli homeen kasvuriskin tarkasteluun, männyn pintapuu

Homeen kasvu
voi alkaa, kun
kosteus (RH)
on yli 75 - 90 %
lämpötilasta ja
kestoajasta
riippuen
(tarkasteltavana
männyn pintapuu)

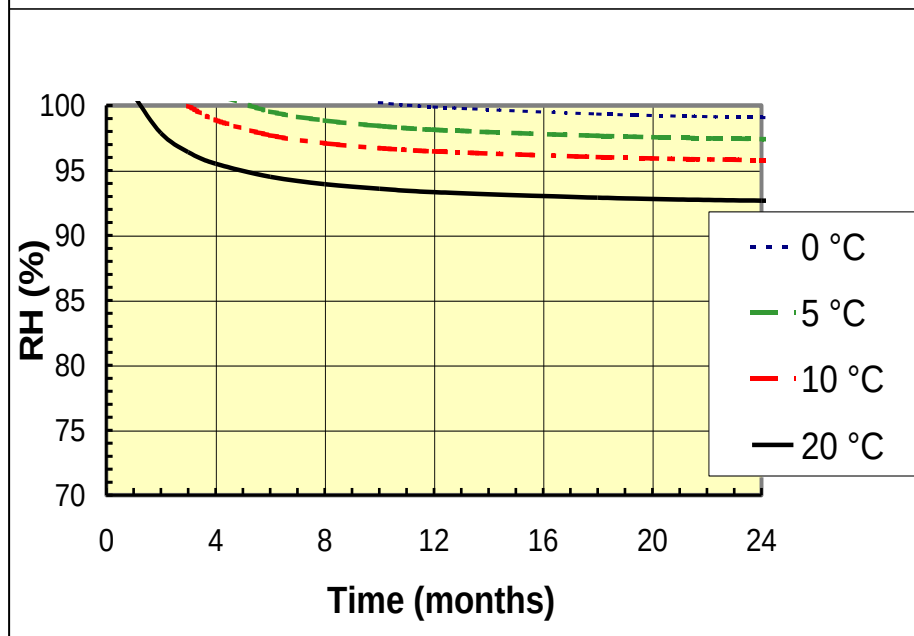


Lahon kehittymiseen vaikuttavat kosteus ja lämpöolot sekä niiden vaikutusaika.

Materiaalia ympäröivän mikroilmaston vaikutus kosteuden tasapainotilassa männyn pintapuun lahoamisen alkamiseen (Viitanen 1996)

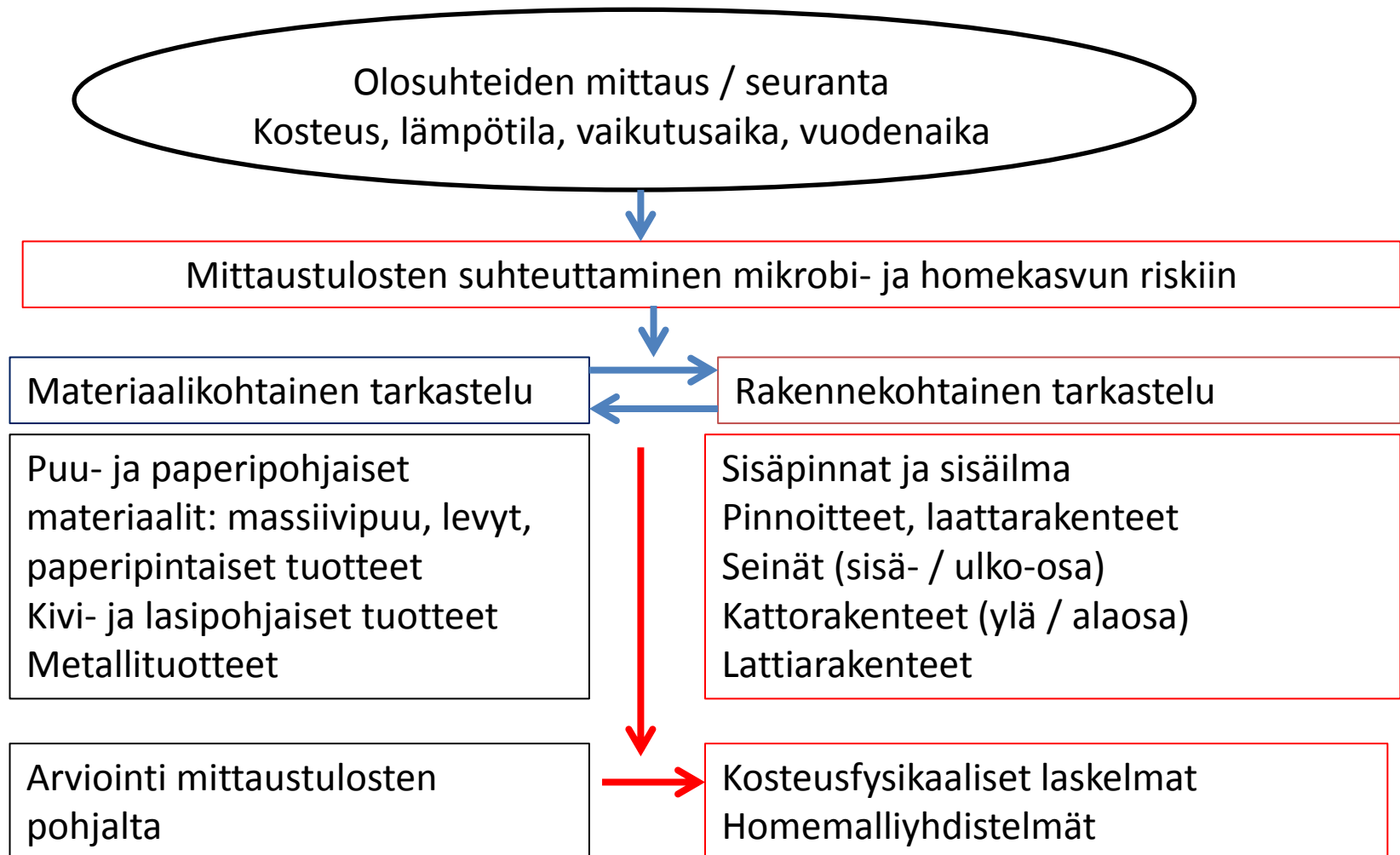
- Lahon kehittymiseen johtavat kosteusolosuhteet männyn pintapuussa **> RH 94 – 99 % (*)**
veden aktiivisuus > 0.94 – 0.99,
puun kosteus (u) > 25 - 30 %
- Selvästi korkeammat kosteusolot **u > 30 - 40 %** tarvitaan lahon etenemiseen.
- Nämä raja-arvot koskevat vain **käsittelemätöntä männyn ja kuusen pintapuuta.**
- Muille puutuotteille raja-arvot voivat vaihdella →
Kyllästetylle puulle nämä arvot eivät päde

* tarkoittaa materiaaleja välittömästi ympäröivän mikroilmaston suhteellista kosteutta, joka vaikuttaa mikrobien tarvitsemaan kosteuteen (veden aktiivisuus)

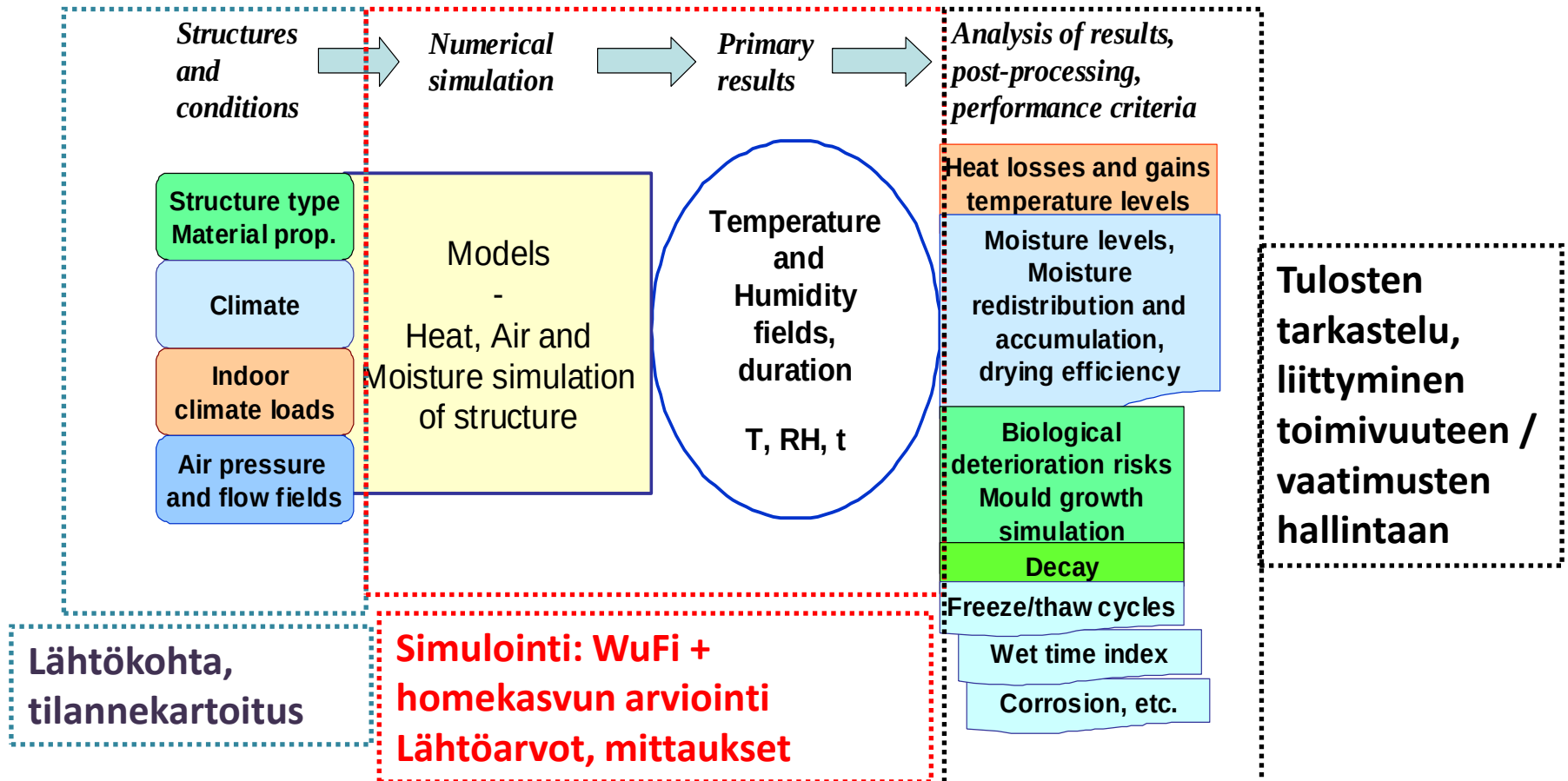


Mikroilmaston RH:n, lämpötilan ja ajan merkitys lahon alkuvaiheen kehittymiseen männyn pintapuussa vakio-oloissa

Homekasvun riskin arviointi rakennuksissa



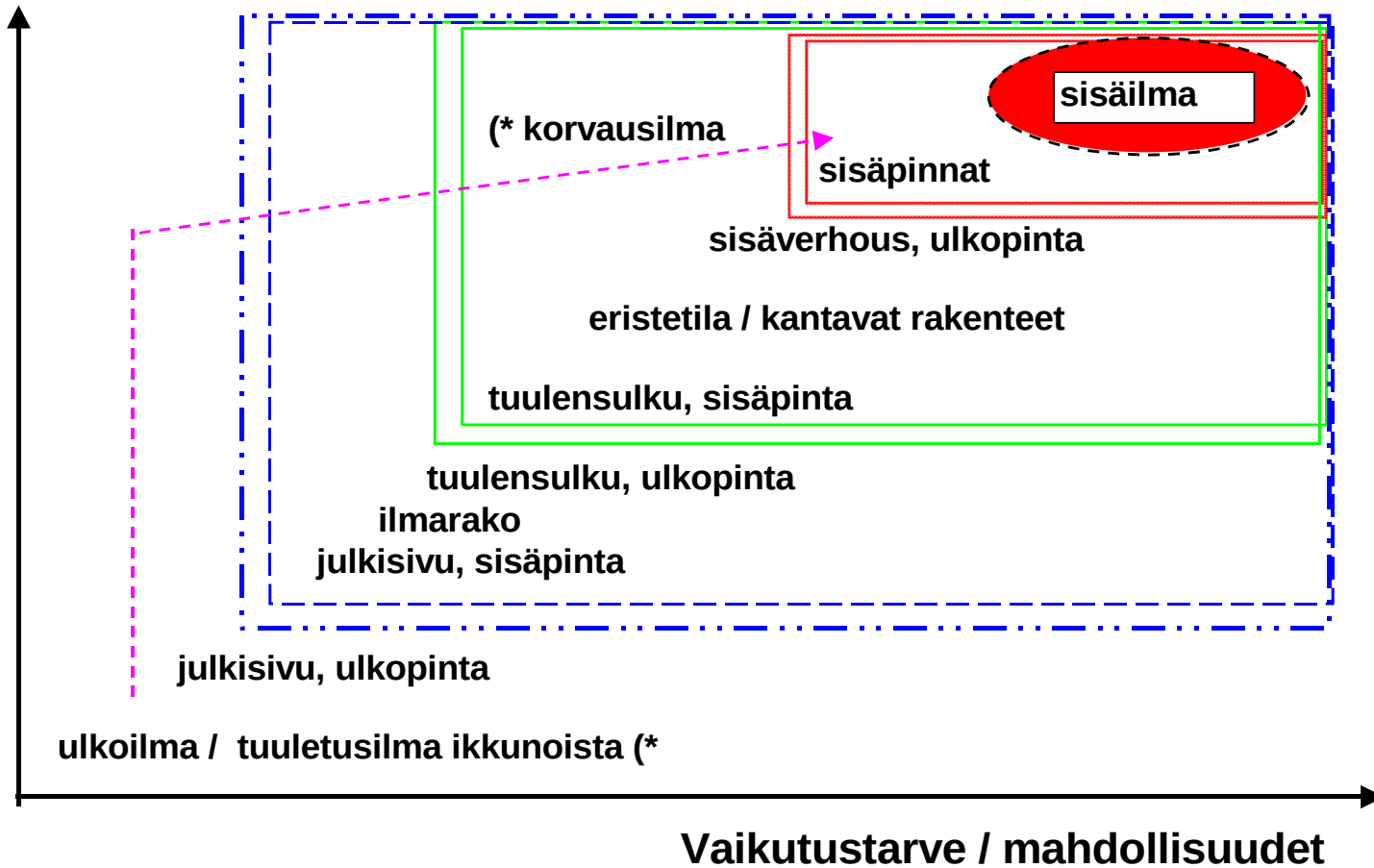
Rakenteiden ja materiaalien kosteusteknisen toimivuuden arviointi vaatimaan tarkasteluun



Vaatimustaso ja vaikutustarve eri rakenneosissa

Lähellä sisäilmaa olevissa rakenteissa vaatimustaso on suurin.

Vaatimustaso



Kokko et al. 1999.

Julkisivujen pitkäaikaiskestävyys

- Rakenteellinen suojaus tärkein lähtökohta
 - Detaljit, saumat, kiinnitykset ja liittymät
- Pintakäsittely ja materiaalin valinta
 - Pintakäsittelyssä useita eri vaihtoehtoja
 - Pintakäsittelyn kestoikä yleensä lyhyempi kuin itse julkisivurakenteen – uusintakäsittelyt tarpeen, riippuen pintakäsittely-yhdistelmästä
- Puu- / tiilijulkisivu
 - Tiilijulkisivun saumat ja purseet voivat johtaa kosteutta sisempiin rakenneosiin -> tiilijulkisivun taustan kosteuskuormat
 - Tiilijulkisivun lämpötilakäyttäytyminen erilainen kuin puujulkisivun
 - Puujulkisivun saumat erilaisia riippuen rakenteesta
- Rakenteen ja pintakäsittelyn yhteisvaikutus tärkeää

Puun rakenteellinen suojaus julkisivuissa, käyttöluokka 3.1 (1)

- **Riittävän leveät räystäät ja korkea sokkeli** (pientalot)
- Vaakapaneeli (avopontti / puolipontti / täyspontti), nurkkalauta suojaa saumat
- **Ponttirakenne** tiivistää rakenteen, pintakäsittely optimoitava rakenteeseen ja detaljeihin
- **Tuulettuvuus:** optimointi niin, että ilmarakoon ei tunkeudu tarpeettomasti kosteaa ulkoilmaa, mutta että satunnainen kosteusrasitus pääsee kuivumaan eikä rasitus pääse siirtymään tuulensulkuun
 - 22 mm ilmarako normaalisti riittävä (lautajulkisivut), optimointi kohdekohtaisesti
- **Pystypaneeli** (alapoikkipinnat vaikea suojata rakennuspaikalla), rakenteellisesti herkkä kohta, alapoikkipintojen pintakäsittely tärkeää
- **Lomalaudoitus** (rakenteessa ei ole pintaa tiivistävää ponttisaumaa -> kiinnitys tärkeää, kiinnitys runkoon), kosteuseläminen voi olla suurempaa

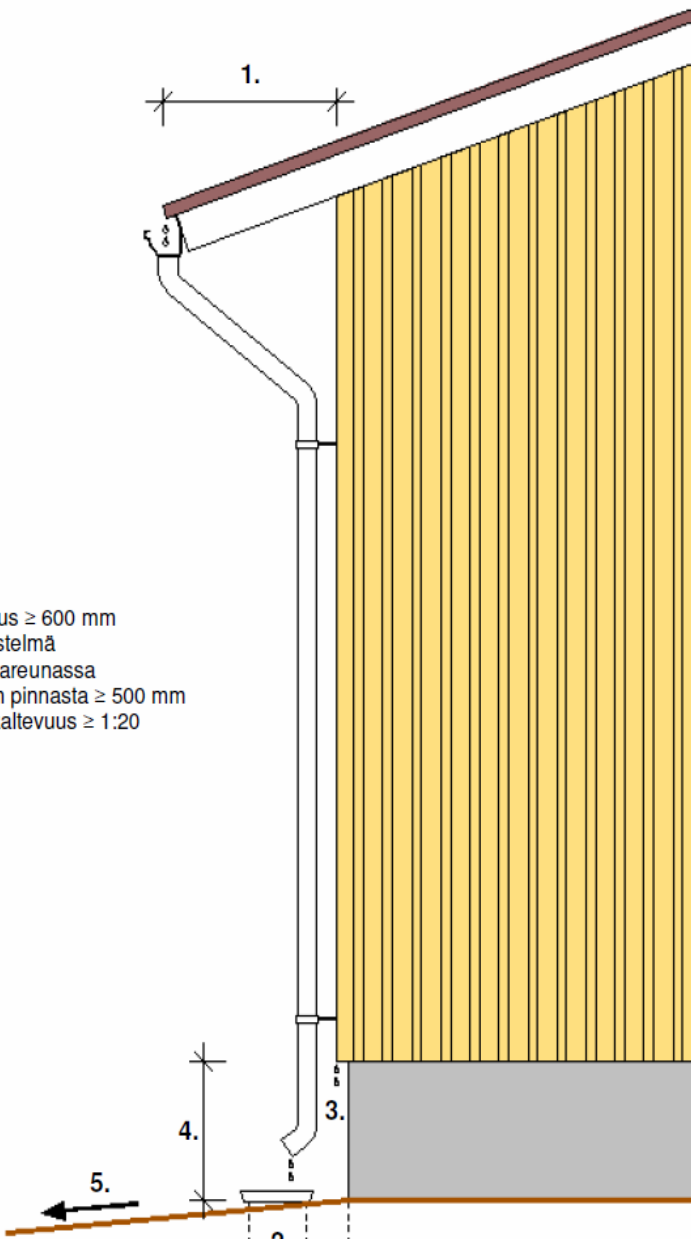


Puun rakenteellinen suojaus julkisivuissa, käyttöluokka 3.1 (2)

- **Saumät, liittymät, pellitykset** (kokonaisuuden suunnittelu)
- **Yksityiskohtien** suunnittelu ja toteutus -> suojaus -> paneelit, koristelistat (veden pitää päästä pinnalta ja rakenteesta pois)
- Laudan pinta- / sydänpuun **asennussuuntaan** vaikuttaa pinnoitteen tiiveys ja seinän rakenne:
 - **Tiiviillä pinnoitteilla** (öljymaalit, osa dispersiomaalit eli lateksimaalit) pinnan suunnalla ei ole vastaavaa merkitystä kuin läpäisevillä pinnoitteilla (kuullotteet).
- **Pinnan karheus** ja pintakäsittelyn toimivuus
- Home kehittyy **kostean ilman** kohdissa, mm. räystäiden alla ja pohjoispuolen julkisivuissa.
- **Sadevesi** ei välttämättä ole homekasvun syynä



Pitkäikäinen puujulkisivu (Wood Focus Oy / Puuinfo) Ulkooverhouksen rakenteellinen suojausohjeet

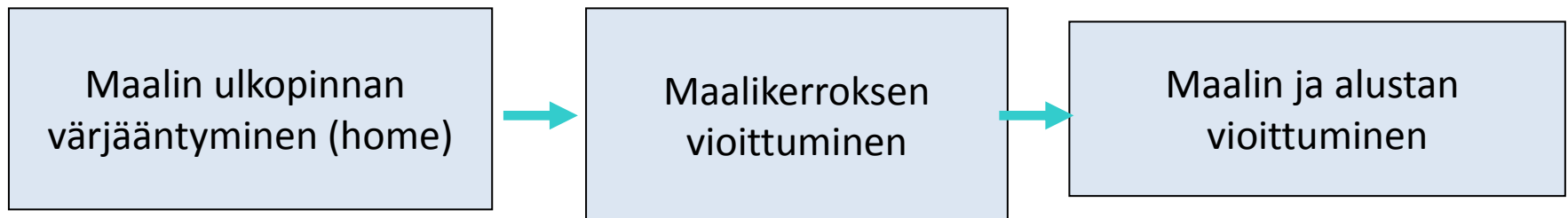
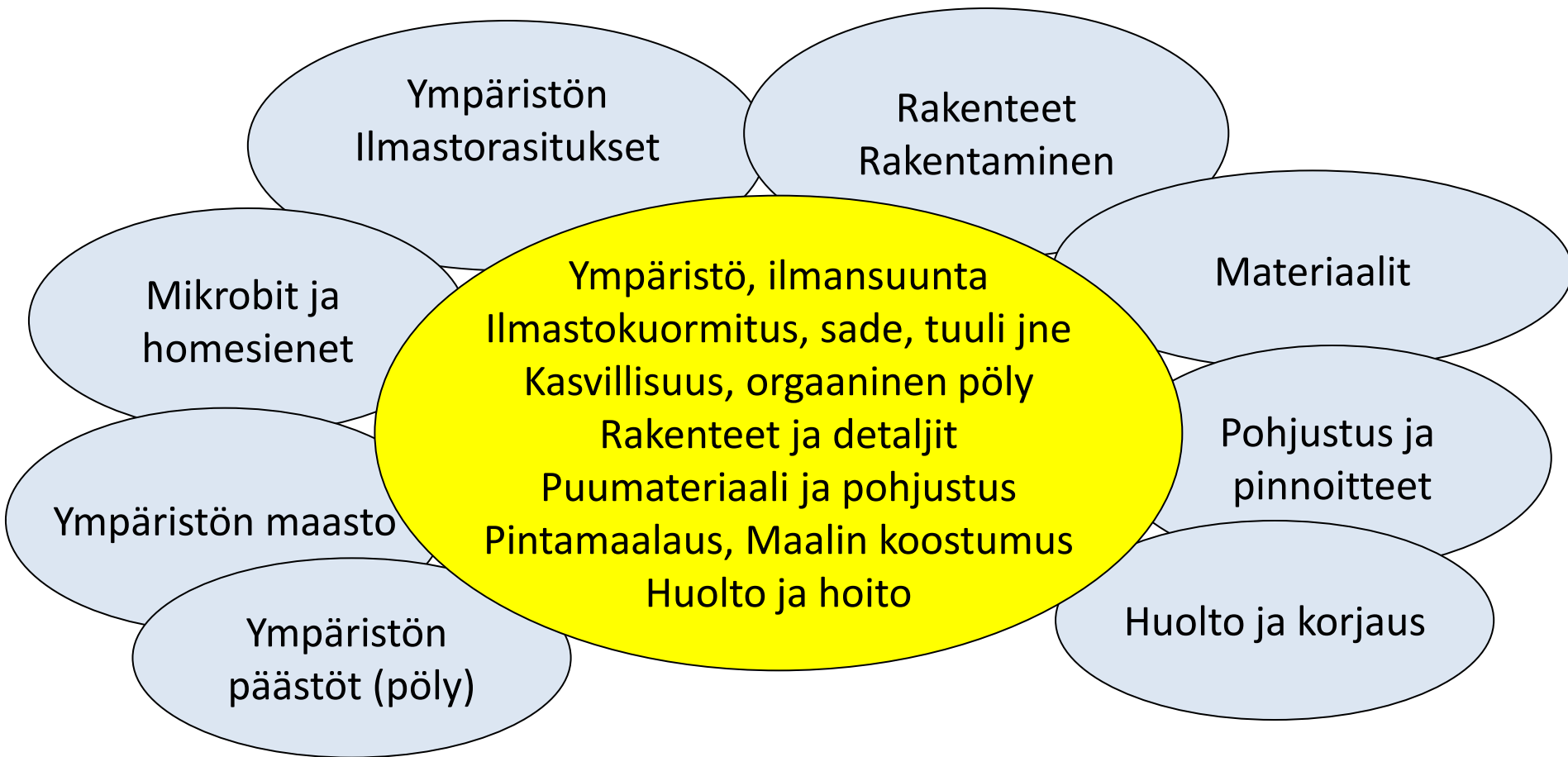
- 
1. Rästään pituus ≥ 600 mm
 2. Sadevesijärjestelmä
 3. Tippanokka alareunassa
 4. Etäisyys maan pinnasta ≥ 500 mm
 5. Maanpinnan kaltevuus $\geq 1:20$

1. Rästään pituus ≥ 600 mm
2. Sadevesijärjestelmä
3. Tippanokka alareunassa
4. Etäisyys maan pinnasta ≥ 500 mm
5. Maanpinnan kaltevuus $\geq 1:20$

Korkeissa rakennuksissa räystään merkitys pienenee. Kuitenkin ilmastokuormitus usein suurin ylimpien kerrosten rakenteissa.

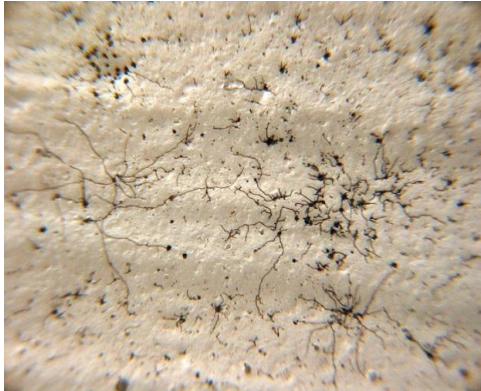
Detaljien ja suojauksen merkitys korostuu -> ei vettä kerääviä detaljeja

Ulkopintojen kestävyysvaikuttavat tekijät (tutkijan näkemys)

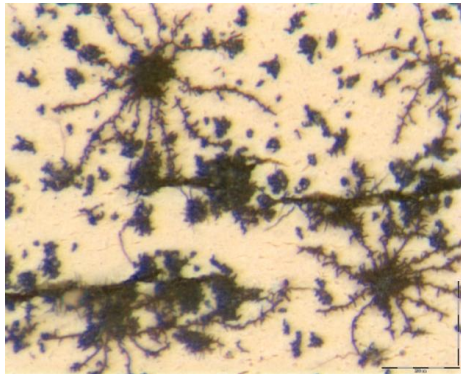


Hometta ja sinistymää maalatussa puussa: puun vaikutus näkyy läpäisevän pinnoitteen läpi

Home vain maalin pinnassa



Home ja sinistymä tunkeutunut maalikerroksen läpi



Sydänpuu

Kuivausriman paikka

Teknisesti hyvin toimiva julkisivu voi olla myös kaunis ja tasapainoinen.



Miten vaikutetaan julkisivun kestävyys- korkeassa rakennuksessa (1)

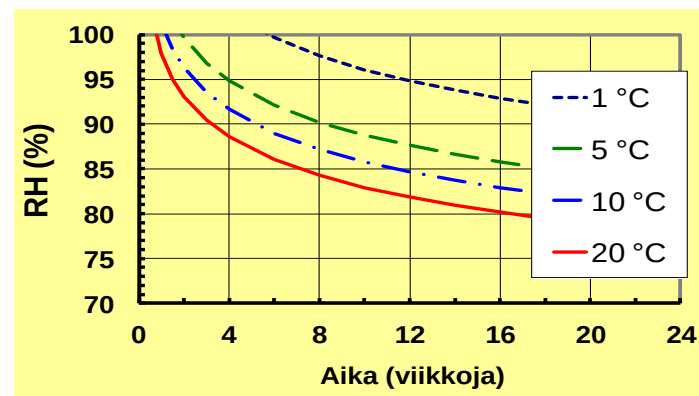
- Käytä **riittävän paksua** verhouslautaa, suositeltava paksuus 28 mm
- Käytä **teollisesti pohjamaalattua** verhouslautaa, mahdollisuuksien mukaan sydäntävaraa (kuusta) ja teollisesti pintakäsiteltyjä
- Harkitse mahdollisia **modifioituja** ja **teollisesti suojattuja** puutuotteita
- **Vältä jatkoksia** tai käytä päätypontattua lautaa ja suojaa saumat
- **Suunnittele ja suojaa detaljit** niin, että vesi ei pääse tai kerry rakenteisiin, muotoile verhouksen alareuna tippanokaksi kussakin kerroksessa
- **Jätä ulkoverhouksen taakse** noin 22...25 mm alhaalta ylös avoin tuuletusrako, tarvittaessa se voi olla kuristettu alhaalta ja ylhäältä jokaisen kerroksen osalta

Miten vaikutetaan julkisivun kestävyYTEEN korkeassa rakennuksessa (2)

- **Sokkelikorkeuden** tulisi olla sellainen, jotta ulkoverhouksen alareuna tulee vähintään 300 mm maanpintaa ylemmäksi (alin kerros)
- **Parvekkeiden** liittyminen rakenteisiin niin, että vesi ei pääse tai kerry rakenteisiin
- **Toimivat ikkunoiden vesipellit** ja listoitukset / vuorilaudat , toimivat sadevesikourut ja syöksytorvet
- **Räystäiden leveys** vähintään 300 mm, mieluummin 600 mm (lähinnä matalat rakennukset)
- Korkeissa rakennuksissa **katto- ja seinärakenteen liittymä** hoidettava niin, että vesi ei pääse tunkeutumaan julkisivun taakse tai kattorakenteisiin
- Ulkoverhouksen **vikojen korjaus ja huoltomaalaus** (ajoitus riippuu mm. rakennuksen sijainnista, korkeudesta, julkisivun rakenteesta ja pinnoitteesta)

Sääolojen muutosten merkitys puurakenteiden pitkäaikaiskestävyyteen (1)

- **Kosteat ja lämpimät talvet** rasittavat etenkin ulkoilmaan rajoittuvia rakenteita: julkisivut, ulkoseinän uloimmat osat, vesikatto- ja ullakkorakenteet, ulkoilmaan rajoittuvat alapohjat (ryömintätilat)
- **Tuulen mukana tuleva viistosade** lisää tuulipaineen aiheuttaman vesikuorman kohdistumista seinärakenteeseen
- > saumat, liittymät ja detaljit altistuvat
- **Julkisivun toiminnallinen suojaaminen** entistä tärkeämpää
-> etenkin yksityiskohtien, liitosten, saumojen ja jatkosten suunnittelu on tärkeää



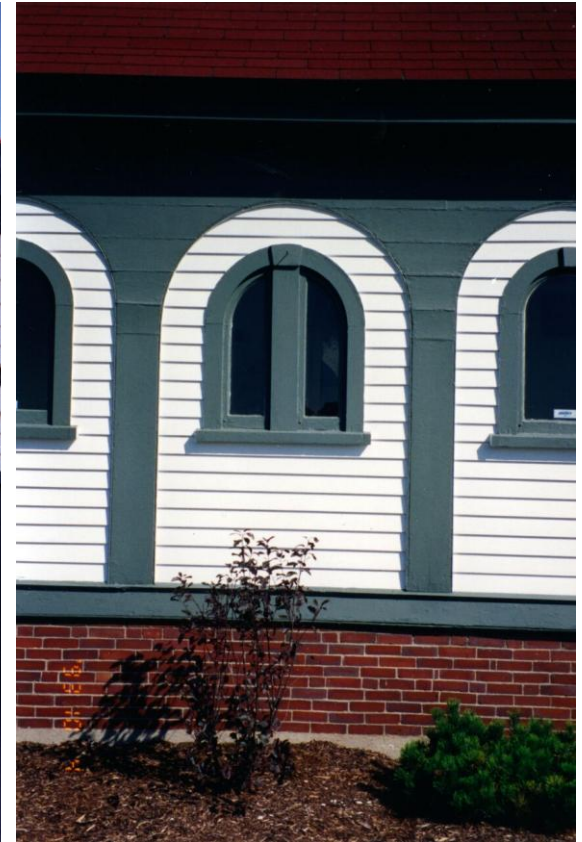
Sääolojen muutosten merkitys puurakenteiden pitkäaikaiskestävyyteen (2)

- **Pintakäsittely-yhdistelmä** tulee liittyä rakenteen toimivuuteen -> perinteen mukaan ponttipaneeliseinä vaatii tiiviimmän pintakäsittelyn kuin hirsiseinä tai lomalaudoitus -> saaristossa hirsiseinä on totuttu perinteisesti suojaamaan julkisivulla.
- **Tiivis rakenne** ja pintakäsittely estää sateen tunkeutumisen sisempiin rakenteisiin, mutta kuivuminen hidastuu -> koko rakenteen toimivuus on mietittävä huolellisesti (esim. vanhojen rakennusten suunnittelu / uudet korkeat rakennukset)
- **Julkisivun taustan** suojaaminen kosteudelta entistä tärkeämpää -> vesi ei saa tunkeutua sisempiin rakenneosiin

Mikrobi- / homekasvun rajoittaminen ja ilmasto

- **Ulkoilmassa** loppukesäisin ja syksyisin korkeat homepartikkelipitoisuudet
- **Ilmavirtojen mukana** partikkelin voivat tunkeutua rakenteiden uloimpiin kerroksiin: etenkin vanhemmissa rakennuksissa homeindeksi 1 yleinen tilanne ?
 - Lämmöneristeiden normaali hometilanne ei selkeä, kuivissa rakenteissa ei ole havaittu mikrobeja
- **Uloimmissa osissa** syksyllä ja talvella korkeampi kosteustila kuin sisemmissä rakennusosissa:
 - Normaalisti voidaan sallia paikallisesti homeindeksin 1 - 2 tason tila uloimmissa osissa, rajatusti ja paikallisesti jopa myös indeksi 3 – 4 (jos ei suoraa yhteyttä tai vaikutusta sisäilmaan eikä kyseessä ole akuutti kosteusvaurio), ilmaston kosteuskuorma ja lämpötila vaikuttaa
- **Ulkopinnoilla** voi olla paikallisesti indeksin 4 – 5 tilanne
- **Eri rakennusmateriaalien** ja rakenteiden ominaisuudet otettava huomioon sekä eri mikrobityypit ja niiden vaikutus rakennuksen toimivuuteen !

Esimerkki pitkäikäisestä julkisivusta



Majakkarakennus USA Itärannikolla, Atlantin rannalla , Maine, Portland. Rakennuksen ja julkisivun ikä yli 100 v. Rakennuksen suunnittelu ja pintakäsittely mietitty ja toteutettu huolellisesti. Pintamaali on tiivis öljymaali ja detaljit suunniteltu vettä pitäviksi etenkin seinän alaosissa.

Kirjallisuutta (1)

- Bongers, F. , Hague, J., Alexander, J., Roberts, M., Imamura, Y. & Suttie, E. 2013. The resistance of high performance acetylated wood against attack by wood-destroying fungi and termites. Int.Res.Group of Wood Prot. IRGWP, Stockholm. Report IRW/WP 13-40621. 15 p.
- CEN TC 38 Wood Durability. WG 28 Performance classification. Performance standards for wood in construction - delivering customer service life needs – Perform Wood.
- Englund, F. (ed). 2008. COST Action E37. Task Force “Performance Classification”. FINAL REPORT.
- Hukka, A, and Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology. 33 (6) 475-485.
- ISO 2007. ISO 15686-1. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles International Standard. 32 p.
- ISO 2007. ISO 15686-7. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice. International standard. 35 p
- Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A. ja Viitanen, H. 1999. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. VTT tiedotteita 1991. VTT Rakennustekniikka. 160 s.
- Kortesmaa, M. 1984. Kantavien puurakenteiden vauriot. RIL K37. Puurakenteet teollisuuden ja julkisissa rakennuksissa. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL, ss. 129 – 143
- Kääriäinen, H., Rantamäki, J. ja Tulla, K. 1998. Puurakenteiden kosteustekninen toimivuus. VTT tiedotteita 1923. 63 s + liitt. 14 s.
- Liimapuukäsikirja 1 – 3. Suomen Liimapuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy.
- Luotonen, P. & Viitanen, H. Rakennusten mikrobi- ja hyönteisongelmat. Vantaa 1995, Tikkurila Oy. 49 s
- Luotonen, P., Paajanen, L. and Vihavainen, T. 1980. Lattiasienen aiheuttamien vaurioiden korjaaminen. Seurantatutkimus. Espoo. VTT Puutavaralaboratorio, Raportti No 4. 30 s. + liitt. 37 s.
- Metiäinen, P. et al. Rakennusten ilmanpitävyyden pysyvyys. VTT Rakennetekniikan laboratorio. Espoo 1986. Tutkimuksia 422. 136 s. + liitt. 29 s.
- Metsä-Kortelainen , S. & Viitanen H. 2015. Durability of thermally modified sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce in the modified double layer test. Wood Material Science & Engineering.

- NWPC 2017. Nordic wood protection classes and product requirements for industrially protected wood. Parts 1 – 4. NWPC Document 1. parts 1 – 4. Nordic Wood Preservation Council, 2017.
- Ojanen, T; Viitanen, H; Peuhkuri, R; Lähdesmäki, K ;Vinha, J; Salminen, K. 2010. Mould growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference (CD). DOE, BETEC, ASHRAE, Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (2010), 10.
- Paajanen, L. & Viitanen, H. Korjattujen lattiasienirakennusten seuranta. Espoo 1987. VTT Tiedotteita 749.
- Puuinfo: Pitkäikäinen puujulkisivu.
- RIL 2011. Kosteus- ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ey. 2011.
- RakMK1988 B1 osa. B1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden varmuus ja kuormitukset. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto
- Ritschkoff, A-C., Viitanen, H. and Koskela, K. 2000. The response of building materials to the mould exposure at different humidity and temperature conditions. In: Seppänen, O. & Säteri, J. (ed). Healthy Buildings 2000. Vol. 4. FiSIAQ, s. 317 – 322
- Samuelson I. 1985. Mögel i hus. Orsaker och åtgärder .Statens provningsanstalt. Teknisk rapport 1985:12.
- Sedlbauer, K. 2001. Prediction of mould fungus formation on the surface of/and inside building components. University of Stuttgart, Fraunhofer (IBP), Doct Thesis. Stuttgart. Germany.
- Thelandersson, S,; Isaksson T,; Früwald, E. and Toratti, T. 2011. Woodexter – Engineering Guidline, version 7. Slides report. C.E.I.Bois, Building with wood
- Tikkanen et al. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjaus. Ympäristöopas 29. Helsinki 1997. Ympäristöministeriö. 79 s.
- Toratti, T. & Arfvidsson J. 2013. Service life and moisture safety. In: Kuittinen, M, Ludvig, A. & Weiss G.(eds) Wood in carbon efficient construction. Tools, methods and applications. CEI-BOIS.pp. 99 – 109.
- Tunnista ja tutki riskirakenne, opetusmateriaali. Hometalokoot. Insinööritoimisto Savora Oy, Crafical.fi, Ympäristöministeriö.
- Vereecken, E. & Roels S. 2012. Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation, Building and Environment 51, p.1-15.
- Vesikari, E; Rautiainen, L; Häkkä-Rönholm, E; Silvennoinen, K; Salonvaara, M; Viitanen, H. 2001. Julkisivujen ja katteiden käyttöiän ennakointi. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo. 158 s. VTT Julkaisuja - Publikationer : 850

Kirjallisuutta (3)

- Viitanen, H. Vuosina 1978 - 1984 tutkitut lahovaurionäytteet . VTT Tiedotteita 593. Espoo 1986. 31 s. + liitt. 6 s.
- Viitanen, H. 1995b. Biologiset rasitukset. RIL 183-3-3...4. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden käyttöikä. Rasitukset: 3.3 Biologiset rasitukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y, 56 s.
- Viitanen, H. 1996. Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Doctoral Thesis . The Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Department of Forest Products. Uppsala (1996), 58 p. + app. 230 p.
- Viitanen, H. 1997a. Modelling the time factor in the development of mould fungi in wood - the effect of critical humidity and temperature conditions. Holzforschung 51 (1): 6-14.
- Viitanen, H. 1997b. Critical time of different humidity and temperature conditions for the development of brown rot decay in pine and spruce. Holzforschung 51 (2): 99-106
- Viitanen, H. 2004. Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet – betonin homeenesto. VTT Working Papers: 6
- Viitanen, H., 2014. 100 years' service life of wood in service class 1 and 2 - dry and moderately humid condition. VTT Research Report VTT-R-04689-14. VTT. 32 p.
- Viitanen, H. and Salonvaara, M.. Failure criteria. 2001. In Trechsel, E (Ed.). Moisture analysis and condensation control in building envelopes. 2001. American Society for Testing and Materials ASTM MNL40 pp. 66 – 80
- Viitanen, H; Vinha, J; Salminen K; Ojanen, T; Peuhkuri, R. Paajanen, L; Lähdesmäki, K. 2010a. Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. Journal of Building Physics. 33 (3) 201-224.
- Viitanen, H; Ojanen, T; Airaksinen, M. 2013. Kosteus-, home- ja laho-ongelmien ja -vaurioiden detektointi ja korjaus. Mitä on opittu viimeisten 30 vuoden aikana?. Sisäilmastoseminaari 2013, Helsingin Messukeskuksen kongressialue, 13.3.2013. Espoo, Sisäilmayhdistys ry.
- Ympäristöministeriö 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöopas 160. Helsinki 2016. 234 s.
- Westin, M. 2013. Report on COST E 37 Round Robin tests. Int. Res. Group on Wood Prot. Stockholm. IRGWP 13-20535.
- Wufi (Wärme und Feuchte instationär - Transient Heat and Moisture) 4.1 Pro software, The Fraunhofer Institute for Building Physics IBP