

Markku Leivo

Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen

Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus

V T T T i e d o t t e i t a

V T T T i e d o t t e i t a

V T T T i e d o t t e i t a

V T T T i e d o t t e i t a

V T T T i e d o t t e i t a

V T T T i e d o t t e i t a

V T T T i e d o t t e i t a

V T T T i e d o t t e i t a

V T T T i e d o t t e i t a

Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen

Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus

Markku Leivo

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5690-9 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5691-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2000

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka,
Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7004

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik,
Kemistvägen 3, PB 1805, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7004

VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology,
Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7004

Toimitus Leena Ukoski

Otamedia Oy, Espoo 2000

Leivo, Markku. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus [Ensuring concrete frost resistance. Part 2. Quality control and requirements]. Espoo 2000. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2047. 13 s. + liitt. 25 s.

Avainsanat concrete, frost resistance, low temperature, quality control, requirements, tests, test methods

Tiivistelmä

Suomessa on herännyt kiivas keskustelu betonien pakkasenkestävyydestä ja sen varmistamisesta, käytettävistä laadunvarmistusmenettelyistä, laadunvalvontamenetelmistä sekä käytettävistä arvostelurajoista. Toisaalta sekä valmistajilla että tilaajilla on epätoivoisuutta siitä, ovatko vaatimukset realistisia, sekä siitä, minkälainen valvontasystematiikan tulisi olla. Valmistajilla tulisi olla menetelmät ja menettelyt, joiden avulla he voisivat varmistaa oman tuotantonsa vaatimuksenmukaisuuden riittävän varmasti. Tilaajalla tulisi toisaalta olla mahdollisuus halutessaan varmistaa vaatimuksenmukaisuus. Näiden kaikkien menettelyjen ja menetelmien tulisi olla yhteismitallisia sekä kohdistua oikeaan ominaisuuteen. Tässä julkaisussa selvitetään keinoja vastata näihin vaatimuksiin.

Leivo, Markku. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus [Ensuring concrete frost resistance. Part 2. Quality control and requirements]. Espoo 2000. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2047. 13 p. + liitt. 25 p.

Keywords concrete, frost resistance, low temperature, quality control, requirements, tests, test methods

Abstract

In Finland, blazing conversation has started on the frost resistance of concrete: how to ensure it, used quality control procedures, quality control tests and used acceptance criterion. On the other hand, manufacturers and customers are unsure if the requirements are realistic and how the quality control should be done. The manufacturer needs procedures and tests which ensure that his own production is as required with a reasonable certainty. The customer also needs a method to control that the product is as required. All of these procedures and requirements should be in-line with each other and aim at the right property. In this report we try to answer these demands.

Alkusanat

Tämä julkaisu on tehty VTT Rakennustekniikassa tehdyn tutkimuksen ”Betoin pakkasenkestävyyden varmistaminen” tuloksena. Tutkimus alkoi syksyllä 1997 ja päättyi vuoden 1999 lopulla. Tutkimuksen tavoitteena oli oikean vaatimustason ja huokostuksen todellisen tarpeen selvittäminen sekä laadunvarmistukseen ja laadunvalvontaan sopivien mittareiden ja testien kehittäminen ja käyttöönotto. Tässä julkaisussa käsitellään vaatimustasoa sekä laadunvarmistuksen järjestämistä.

Tutkimusta ohjasi johtoryhmä, johon kuuluivat Kauko Linna Lohja Rudus Oy:stä, Matti T. Virtanen Betoniteollisuuden laaduntarkastus ry:stä (BLT), Heikki Sarin ja Jouni Punkki Parma Betonila Oy:stä, Pirjo Tepponen, Maarit Järvinen ja Jorma Virtanen Finnsementti O:stä, Ossi Räsänen Tielaitokselta, Tarja Tukia VVO:sta, Arto Suikka ja Seppo Petrow RTT:stä, Tom Warras Teknologian kehittämiskeskuksesta (Tekes), Vesa Penttala Teknillisestä korkeakoulusta (TKK) ja Heikki Kukko VTT:ltä. Lisäksi johtoryhmätyöskentelyyn osallistuivat asiantuntijoina Heikki Aapro Parma Betonila Oy:stä ja Ari Ipatti Fortum Oy:stä. VTT:n tutkijaryhmän muodostivat: Markku Leivo, Hannele Kuosa, Erkki Vesikari, Hannu Pyy sekä Heikki Kukko. Tutkimuksen rahoittivat Tekes, RTT, BLT sekä VTT.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	7
2. Tutkimuksen tavoitteet	8
3. Pakkasrasitus	9
4. Pakkaskestävyyden varmistaminen	12
Lähdeluettelo	13
Liite A. Betonin pakkaskestävyyden varmistaminen. Pakkaskestävyyden laadunvalvonta	
Liite B. Betonin pakkaskestävyyden varmistaminen. Rakennuttajan laadunvarmistusohje	

1. Johdanto

Betonirakenteiden käyttöiällä on suuri merkitys sekä taloudellisesti että rakennetun ympäristön laadun ja viihtyisyyden kannalta. Rakentamisen huippuvuosina rakennettujen kerrostalolähiöiden rapistuminen on Suomessa vakavaksi todettu ongelma. Vanhojen julkisivujen korjaustarpeeksi on arvioitu seuraavien kymmenen vuoden aikana peräti 3,6 mrd markkaa (*Nippala & Jaakkonen, 1996*).

Samaan aikaan on herännyt keskustelu uusien betonisten julkisivujen pakkasenkestävyydestä ja sen varmistamisesta (*Söderlund, K. 1997, s. 7*). On esim. kyseenalaistettu huokostuksen tarpeellisuus julkisivuelementtien betoneissa, mikäli lujuusluokka on K40–K45. Perusteena on käytetty tietoa, että huokostusta ei vaadita muissa maissa. Toisaalta kokemukset huokostuksen vaikutuksesta ovat Suomessa hyviä. Kuitenkin huokostaminen lisää sementin kulutusta ja vaikeuttaa betonin valmistusta ja laadun hallintaa.

Ongelmakenttä on samanlainen myös muissa ulkorakenteissa ja koskee sekä elementti-että paikallarakentamista.

Sekä valmistajilla että tilaajilla on ollut epätietoisuutta siitä, minkälainen on uusien rakenteiden pakkasenkestävyys, koska laadunvarmistuksen koekappaleiden ja todellisen rakenteen betonin välillä on todettu eroja. Valmistajat haluavatkin todeta huokostuksen pysyvyyden nopealla tehdas- tai työmaakokeella. Valmistajilla tulisi olla menetelmät ja menettelyt, joiden avulla he voisivat varmistaa oman tuotantonsa vaatimuksenmukaisuuden riittävän varmasti. Tällaisista kokeista ei ole Suomessa kokemusta.

Rakennuttajien taholta on esitetty vaatimus pakkasenkestävyyden toteamisesta valmiista rakenteista. Tarvittiinkin tutkimusta siitä, ovatko rakennekoekappaleista tehtyjen kokeiden vaatimukset realistisia, sekä siitä, minkälainen on tarvittava laadunvarmistusjärjestelmä. Toisaalta tilaajalla tulisi olla mahdollisuus halutessaan varmistaa jopa pistokokein vaatimuksenmukaisuus. Näiden kaikkien menettelyjen ja menetelmien tulisi olla yhteismitallisia sekä kohdistua oikeaan ominaisuuteen. Varmuusajattelu tulisi huomioida myös säilyvyyden arvioinnissa ja käyttöikämitoituksessa (kuten lujuuden osalla jo tehdään, vrt. normikoekappaleet/rakennekoekappaleet).

2. Tutkimuksen tavoitteet

1. Betonin huokostuksen tarpeellisuus ja luotettavuus

Huokostuksen todellista tarvetta selvitetään kansainvälisten kokemusten perusteella ja kokeellisesti. Koska tarpeeton huokostus vaikeuttaa lujien betonien valmistusta ja nostaa materiaali- ja laadunvalvontakustannuksia, selvitetään, millä edellytyksillä ja minkälaisilla betoneilla huokostuksesta voidaan luopua. Tarkistetaan huokostuksen vähentämisen vaikutus säilyvyyden varmuustasoon. Selvitetään myös huokosrakenteen pysyvyys valun ja tiivistyksen yhteydessä.

2. Testausmenetelmät

Selvitetään huokostuksen ja pakkasenkestävyyden testausmenetelmien luotettavuus eri menetelmillä. Selvitetään betonimassan ilmahuokosmäärää ja -jakaumaa mittaavan menetelmän käyttökelpoisuus tehdaskohtaisessa laadunvalvonnassa perinteisen ilmamäärämittauksen sijasta ja/tai rinnalla. Selvitetään ilmahuokosrakenteen valvomismahdollisuudet tiivistetystä elementtimassasta.

Rakenteesta otetuin näyttein tehtävä pakkasenkestävyysanalyysi: Selvitetään huokosanalyysin luotettavuus ja vertailukelpoisuus muihin kokeisiin verrattuna. Erityisesti selvitetään huokosanalyysin kriteerien (ominaispinta-alan, huokosjaon) oikea taso.

3. Betonirakenteiden käyttöikämitoitus ja laadunvarmistus

Laaditaan ehdotus käyttöikämitoituksesta pakkasenkestävyyden suhteen siten, että malli ja laskentamenetelmät soveltuvat myös lujuusalueen 40–60 MPa betonille. Erityisesti kehitetään julkisivubetonin käyttöiän arviointiperusteet todellisiin säärasituksiin (säätilastot), laboratoriokokeisiin (materiaaliparametrien määrittäminen) ja laskennallisiin menetelmiin perustuen. Sovelletaan materiaali- ja testausmenetelmäosatutkimusten tuloksia käyttöikämitoituksen tarkentamiseksi.

4. Laadunvarmistusjärjestelmä

Laaditaan ehdotus valmistajien laadunvarmistusjärjestelmäksi ja tilaajien laadunvalvontamenettelyksi. Ehdotukset testataan vertailevin tehdaskokein. Ehdotuksia tarkennetaan lausuntokierroksen perusteella.

Tässä julkaisussa käsitellään vain tavoitteen 4 asioita. Koko tutkimuksen muidenkin osien tulokset otetaan kuitenkin huomioon. Tätä julkaisua voikin pitää eräänlaisena tiivistelmänä koko tutkimuksen tuloksista. Liitteet A ja B esittävät valmistajan ja tilaajan menettelyt betonin pakkasenkestävyyden varmistamisessa.

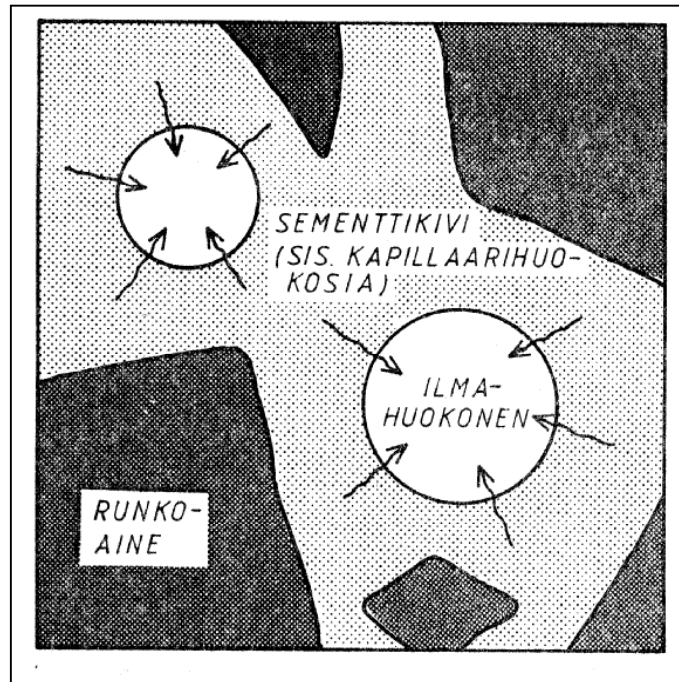
3. Pakkasrasitus

Suomessa kaikkiin ulkobetonirakenteisiin kohdistuu voimakkuudeltaan vaihteleva pakkasrasitus. Betonin sisältämän veden toistuva jäätyminen aiheuttaa pakkasrasituksen. Olennaiset tekijät pakkasrasituksen voimakkuudessa ovat betonin kosteuspitoisuus jäätyamisen tapahtuessa sekä jäätymissykliä lukumäärä. Kosteuspitoisuuteen vaikuttavat rakennuksen sijainti sekä suojaavat rakenteet, kuten räystäät. Mitä kuivempaan betonirakenteeseen pakkasrasitus on siihen kohdistuva pakkasrasitus. Jäätymissykliä lukumäärään vaikuttaa merkittävästi rakenteen suunta. Eteläsuolelle kohdistuu auringon lämmittävän vaikutuksen johdosta enemmän jäädytys-sulatussyklejä vuodessa kuin pohjoiselle.

Betonin sisältämän veden toistuva jäätyminen aiheuttaa betoniin säröilyä, joka heikentää betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia sekä lisääntyessään aiheuttaa betonin lohkeilua ja rapautumista. Betonin sisältämä vesi jäätyy sitä matalammassa lämpötilassa mitä pienemmässä huokosessa se on. Betonin geelihuokosissa oleva vesi ei jäädy käytännössä esiintyvissä lämpötiloissa. Siten pakkasrasituksen kannalta merkittäviä ovat kapillaarihuokokset. Jäätyessään vesi laajenee 9 %. Tämä tilavuudenkasvutyöntä jäätyäntä vettä jään edeltä pois. Tämä aiheuttaa betonin sisälle hydraulisen paineen, joka noustessaan liian suureksi murtaa betonia paikallisesti aiheuttaen säröjä. Painetta lisää jääkiteiden kasvun aiheuttama paine.

Tavallinen huokostamaton betoni kestää pakkasrasitusta yleensä huonosti. Pakkaskestävyys saadaan kuitenkin erinomaiseksi lisäämällä betoniin huokostamalla suoja- huokosia. Suojahuokokset pysyvät kosteassakin betonissa ilmatäytteisinä ja pystyvät täten tasaamaan kapillaarihuokosissa olevan veden jäätyessään aiheuttamaa hydraulista painetta (kuva 1). Ne toimivat myös kapillaarihuokosten sijasta paikkana, johon jääkiteet voivat muodostua aiheuttamatta rasitusta betonille.

Jotta lisähuokostus olisi tehokasta, tulee betonissa olla tietty minimimäärä suoja- huokosia, joiden tulee olla pieniksi huokosiksi tasaisesti jakautuneena betonissa. Pakkasrasitukselle on olennaista, että se vaurioittaa betonia sieltä, missä se on heikoimmillaan. Huokostuksen epätasainen jakautuminen aiheuttaa siis sen, että rakenne vaurioituu sen kohdan mukaisesti, jossa on huonoin suoja- huokostus. Siksi huokostuksen tasaisuuteen tulee kiinnittää erityistä huomiota.



Kuva 1. Veden tunkeutuminen kapillaarihuokosista ilmahuokosiin jäätymistilanteessa (Vesikari, E. 1986).

Ulkoisia rasitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi rakenteen kastuminen ja jäädytys-sulatussyklien määrä. Sisäisiä pakkasenkestävyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat betonin koostumuksesta riippuvat tekijät. Näitä ovat esimerkiksi jäätyvän veden määrä, joka riippuu betonin kapillaarihuokosjakaumasta (lähinnä siis vesi-sementtisuhteesta) sekä ilmahuokosrakenne (ilmahuokosten määrä ja jakautuminen). Betonia suojaa parhaiten pakkasrasitukselta hyvin hienojakoiseksi huokosiksi jakautunut ilma. Tällainen hyvin pienistä ilmahuokosista koostuva huokostus myös pysyy betonimassassa työstämisen ajan hyvin. Betonin työstettävyys on myös parhaimmillaan, kun ilmahuokokset ovat hyvin pieniksi kupliksi tasaisesti jakautuneet.

Betonin vesi-sementtisuhteen laskiessa (lujuuden noustessa) kapillaarihuokosten osuus pienenee ja täten jäätyvän veden määrä vähenee. On esitetty, että vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,30–0,35 (sideaineesta riippuen) betonissa olisi niin vähän jäätyvää vettä, että betonin luonnollinen ilmapitoisuus takaisi riittävän pakkasenkestävyyden normaalioloissa. Tällaiset betonit ovat korkealujuusbetoneja. Normaaleilla rakenteissa käytettävillä lujuustasoilla jäätyvän veden määrä on niin suuri, ettei riittävää pakkasenkestävyyttä saavuteta huokostamatta esimerkiksi julkisivuissa esiintyvillä rasituksilla.

Lisähuokostus tarjoaa tilan tasaamaan kapillaarihuokosissa olevan veden jäätyessään aiheuttamaa painetta. Ilmahuokosten määrän on oltava riittävä tarjoamaan tilaa vedelle. Huokosten tulee olla riittävän lähekkäin, jotta paineen ajamalla vedellä olisi riittävän

lyhyt matka kuljettavanaan ilmahuokoseen. Mikäli matka on pitkä, paine ehtii kasvaa liian isoksi ja vaurioittaa betonia. Teoreettisesti yleensä aina merkittävämpänä tekijänä betonin pakkasenkestolle on huokosten riittävän pieni etäisyys. Kokonaisilmapitoisuus on yleensä tällöin riittävä.

Betonin pakkasenkestävyyden edellytyksinä ovat kohtuullisen alhainen vesi-sementti-suhde sekä sopiva huokostus.

4. Pakkaskestävyyden varmistaminen

Betonin pakkaskestävyyteen vaikuttavat useat betonin materiaali- ja valmistustekniset valinnat. Jotta valmistaja voisi olla varma valmistavansa tilaajan haluamaa tuotetta, hänen tulee tehdä riittävät esikokeet. Erilaisten normien ja ohjeiden esittämät minimikokeet eivät useinkaan riitä muutostilanteissa. Valmistajan tulee myös sisäistää se, että tilaajat haluavat ja ovat ostaneet pakkaskestävää betonia eivätkä kokeen tuloksia. Laadunvarmistuksessa tuleekin kiinnittää huomiota valmiin tuotteen kelvollisuuteen ja käyttää kokeita vain tämän tavoitteen saavuttamisen apuvälineinä.

Nykyisin pakkaskestävyyden arvostelukokeena käytetään yleisimmin ilmamäärää, suojahuokoskoetta sekä huokosjakokoetta. Ilmamäärän kokeesta tulee muistaa se, että se kuvaa vain massan ilmapitoisuutta. Se, kuinka tämä ilmapitoisuus on jakautunut massaan ja kuinka hyvin se säilyy valmistusprosessissa valmiiseen tuotteeseen, tulee varmistaa muilla tavoin (lähinnä esikokein). Suojahuokoskoekappaleilla valmiista rakenteesta tai samalla valmistustavalla erikseen valmistetuilla koekappaleilla pyritään varmistamaan työmenetelmien sopivuus pakkaskestävän rakenteen valmistamiseen. Suojahuokoskoekokeella pyritään selvittämään ilman pysyvyys massassa. Suojahuokoskoetta tehtäessä tulee varmistaa, että tehdyt koekappaleet todella vastaavat rakenteita. Jos esimerkiksi halutaan varmistua kaksikerrosvalun 3 cm paksun ulkokerroksen pakkaskestävyydestä, tulee käytetty koekappale valmistaa tällöin 3 cm paksuna. Ilmahuokosten jakaumasta saadaan vain välillinen tieto. Huono ilmahuokosjakauma ei todennäköisesti pysy betonin käsittelyn aikana massassa. Suora tieto ilmahuokosjakaumasta saadaan nykytietämyksellä ainoastaan hieanalyysillä. Muutoksia materiaaleissa ja valmistustavoissa tehtäessä olisikin suositeltavaa tehdä hieanalyysijä, jotta varmistuttaisiin riittävän huokostuksen lisäksi hyvästä ilmahuokosjakaumasta.

Liitteissä A ja B esitetään ehdotus laadunvalvonnan periaatteista sekä käytettävistä hyväksymismenettelyistä ja -kriteereistä. Uutta ehdotuksessa on betonien jakaminen käyttötarkoituksensa ja käytettyjen materiaalien perusteella arvostelueriin. Näiden arvosteluerien muodostaminen ja laadunvalvonnan suoritus esitetään. Samoin uutta on kahden suunnittelukäyttöään (50 ja 100 vuotta) huomioiminen pakkasrasitetuissa rakenteissa.

Lähdeluettelo

Nippala, E. & Jaakkonen, L. 1996. Asuinkerrostalojen kuntoarvio. Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 18.

Söderlund, K. 1997. Pelkkää ilmaa? Betoni 1/97, s. 7.

Vesikari, E. 1986. Betonirakenteiden käyttöikä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tutkimuksia – Forskningsrapporter – Research Reports 417. 88 s.

Liite A

Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen

Pakkasenkestävyyden laadunvalvonta

1. Johdanto	3
2. Tausta	4
3. Vaatimukset	5
4. Vaatimukset ja varmuus	7
5. Laadunvarmistus ja kelpoisuuden todentaminen	8
6. Ennakkokokeet	9
7. Jatkuvan tuotannon valvonta	11
8. Toiminta epätyydyttävän laadun ilmetessä	13



1. Johdanto

Tässä ohjeessa esitetään ehdotus laadunvalvonnan järjestämisestä sekä elementti- että valmisbetonituotannossa. Raportti on käynyt läpi Pakkaskestävyyden varmistus-tutkimuksen johtoryhmän sekä RTL:n (SFS Sertifiointi) työryhmän kommenttikierroksen ja muutokset. Raportin sisältö on ehdotus ja saattaa vaatia ohjeeksi edetäkseen vielä muotoilua.

Ohjeessa esitetään ehdotus laadunvalvonnan periaatteista sekä käytettävistä hyväksymismenettelyistä ja -kriteereistä. Uutta ehdotuksessa on betonien jakaminen käyttötarkoituksensa ja käytettyjen materiaalien perusteella arvostelueriin. Näiden arvosteluerien muodostaminen ja laadunvalvonnan suoritus esitetään. Samoin uutta on kahden suunnittelukäyttöään (50 ja 100 vuotta) huomioiminen pakkasrasitetuissa rakenteissa.

2. Tausta

Tässä ohjeessa käsitellään pääsääntöisesti sellaisia talonrakennuksen rakenteita, jotka kuuluvat Betoninormien mukaiseen luokkaan Y2. Suunnittelija selvittää tällaisille pakkasrasitetuille rakenteille tarpeelliset vaatimukset pakkasenkestävyydelle ja merkitsee ne piirustuksiin. Julkisivubetonille asetetaan aina pakkasenkestävyysvaatimus.

Tämän ohjeen mukaan toimittaessa suunnittelija valitsee rasitusluokan rakenteelle ja vaatimukset tulevat sitten tämän ohjeen vaatimustaulukoista. Suunnittelijan ei tarvitse itse määrittää vaatimuskokeita ja vaatimuksenmukaisuuden arvioitikkriteerejä, vaan ne saadaan suoraan tästä ohjeesta.

Tässä ohjeessa esitetään vaatimukset sekä 50 että 100 vuoden suunnittelukäyttöiälle. Standardin ENV 1991-1 mukaan nämä suunnittelukäyttöiät on tarkoitettu käytettäväksi tavallisilla (50 vuotta) tai tavallista kalliimmilla tai vaativammilla (100 vuotta) rakennuksilla ja rakenteilla.

Betoninormien mukaan yleensä pakkasenkestävyyden saavuttamiseksi riittää suojahuokossuhteelle asetettu vaatimus 0,20. Betonin lujuusluokan tulisi olla betoninormien mukaan \geq K40. Jos suojabetonikerrosta kasvatetaan, voidaan lujuusluokka laskea K30:een (normin taulukko 4.2). Tällöin suojabetonikerros on Y2-luokassa jo 35 mm. Normaalisti tässä luokassa riittää 25 mm. Lujuuden osalta käytännöksi ovat jo muodostuneet muiden (esim. BY 32:n) ohjeiden vaatimukset lujuudelle K35–K45.

Suunnittelijan tulee ennen tätä ohjetta siis määrittellä sekä pakkasenkestävyyden arvostelukoe että arvosteluraja. Suojahuokossuhdekoe on normien ehdotus tai esimerkki. Muita mahdollisia kokeita ovat suora jäädytys-sulatuskoe vaatimuksena esim. taivutus- tai halkaisulujuuden enintään 33 %:n lasku, suola-pakkaskoe sekä hieanalyysi, jossa huokosjakona on 0,20–0,30 mm.

Tutkittaessa vaatimustason asettamista ilmahuokosparametreille on todettu, että pakkasenkestävyyden kannalta merkittävin betonin huokostusta kuvaavista suureista on huokosjako. Itse ilmapitoisuus tai suojahuokossuhde eivät sinänsä suoraan kuvaa huokostuksen tehokkuutta. Ne tietenkin korreloivat huokosjaon ja siten myös pakkasenkestävyyden kanssa, mutta tarkkuudeltaan heikommin kuin huokosjako. Tämän takia tuleekin erityisesti hyvää pakkasenkestävyyttä ja suurta varmuutta haettaessa harkita huokosjaon suuruuden perusteella tehtävää kelpoisuuden arvostelua.

3. Vaatimukset

Tässä ohjeessa esitettävät kokeet voidaan tarkkuutensa perusteella asettaa järjestykseen epätarkimmasta tarkimpaan: tuoremassan ilmapitoisuus, suojahuokoskoe, huokosjako, suora pakkaskoe. Tarkemmalla menetelmällä voidaan aina osoittaa pakkasenkestävyys, vaikka vaatimus olisikin asetettu epätarkemmalla menetelmällä.

Vaatimusta asettaessa tulee huomioida se, että eri rakenteisiin kohdistuu erisuuruinen pakkasrasitus ja eri rakenteille suunnitellaan eri käyttöikä. Tässä ohjeessa on rasitukset jaettu kolmeen luokkaan: suola-pakkasrasitus, ankara pakkasrasitus ja kohtuullinen pakkasrasitus. Suunnittelukäyttöiät 50 ja 100 vuotta käsitellään tässä ohjeessa. Suunnittelija määrittelee rakenteen rasitusluokan ja suunnittelukäyttöiän. Ylensä suunnittelijan ei tarvitse määrittää tarkkaa arvostelukoetta tai arvostelukriteerejä. Riittää, että hän viittaa näihin ohjeisiin. Vain erityisistä syistä voi olla tarvetta erikseen määrittää kohdekohtaiset arvostelukriteerit.

Betonin ja elementtien valmistajat voivat valita arvostelukokeeksi heidän toimintaansa parhaiten soveltuvan menetelmän. Tulee kuitenkin muistaa, että tarkemman kokeen tulos on aina ratkaiseva lopullisessa kelpoisuuden toteamisessa.

Suola-pakkasrasitetuissa rakenteissa ja ankaran pakkasrasituksen alaisissa rakenteissa ei suojahuokoskokeen (SFS 4475) käyttöä pakkasenkestävyyden arvosteluun suositella. Suojahuokoskokeesta tulee muistaa, ettei se sovellu korkeiden lujuusluokkien betoneille. Koeteknisesti kokeen soveltamisala loppuu ainakin yli K50:n betoneilla. Koe soveltuu paremmin lujuusluokille K20–K35. Korkeammilla lujuusluokilla kuin K 50 tulee pakkasenkestävyys aina arvostella joko huokosjakona tai suorana pakkasenkestävyyskokeena. Huokosjako määritetään ohjeen VTT TEST R003-00 mukaisesti.

Vaatimustasoa asetettaessa on tiedostettava, että erilaisissa rakenteissa on hyvinkin erilainen pakkasrasitus ja siksi vaatimustaso tulee tarkastaa kohdekohtaisesti. Kuitenkin vain taulukoiden 1 tai 2 arvojen käyttöä suositellaan. Tällöin ennakkokokeiden tarve ei kasva kohtuuttomaksi. Tämän ohjeen mukaisesti toimittaessa noudatetaan taulukkojen 1 tai 2 rasitusluokitusta ja esitettyjä arvoja. Tarkemman kokeen käyttäminen pakkasenkestävyyden toteamiseen voidaan tällöin tehdä käyttäen taulukoiden 1 tai 2 arvoja.

Betonin sementtimäärän ja vesi-sementtisuhteen arvot saadaan valmistuksen aikaisista punnitusraporteista.

Taulukko 1. Vaatimustasot erilaisissa rasituksissa 50 vuoden suunnittelukäyttöiällä.

	Suola- pakkasrasitus	Ankara pakkasrasitus	Kohtuullinen pakkasrasitus
Minimi sementtimäärä kg/m ³ ²⁾	300	280	280
Maksimi vesi-sementtisuhte	0,50	0,55	0,60
Ilmamäärä % ¹⁾ , SFS 5287	5,0–7,0	4,0–6,0	3,5–5,5
Minimi lujuusluokka ³⁾	K35	K35	K35
Suojahuokossuhde, SFS 4475	(0,25)	0,25	0,20
Huokosjako mm, VTT TEST R003-00	0,20	0,23	0,27
Vedenpitävyys, SFS 4476	Vaaditaan	Vaaditaan	Ei vaadita

Taulukko 2. Vaatimustasot erilaisissa rasituksissa 100 vuoden suunnittelukäyttöiällä.

	Ankara pakkasrasitus	Kohtuullinen pakkasrasitus
Minimi sementtimäärä, kg/m ³ ²⁾	280	280
Maksimi vesi-sementtisuhte	0,50	0,55
Ilmamäärä % ¹⁾ , SFS 5287	5,0–7,0	4,0–6,0
Minimi lujuusluokka ³⁾	K40	K40
Suojahuokossuhde, SFS 4475	0,26	0,24
Huokosjako mm, VTT TEST R003-00	0,22	0,25
Vedenpitävyys, SFS 4476	Vaaditaan	Ei vaadita

- 1) Ilmamäärävaatimus on ohjeellinen ja tarkoitettu tuotannon aikaiseen valvontaan. Tarkka tuotannon vaatimustaso saadaan ennakkokokeista. Arvot koskevat ≥ 16 mm:n maksimirunkoaineista betonia. Mikäli maksimi runkoaine 12 mm, lisätään vaatimuksia +0,3 %-yksikköä ja 8 mm runkoaineella + 0,6 %-yksikköä.
- 2) Sementtimäärä koskee CEM I ja CEM II A -sementtejä. CEM II B -sementillä vaatimusta korotetaan 10 %.
- 3) Raudoituksen suojabetonikerroksen ja korroosiokeston salliessa lujuusvaatimus on tämä, muuten K45. Lujuusvaatimus siis sama kuin BY 32.
 - Suolapakkasrasitus: rakenteeseen kohdistuu suolan ja pakkasen yhtäaikainen rasitus. Ulkoportaat jne.
 - Ankara pakkasrasitus: Betoni voi jäätymä märkänä. Vaakarakenteet ulkona, hyvin märät pystypinnat esimerkiksi meren rannassa, pystyrakenteen kohdat, joissa esim. sadevesi kerääntyy voimakkaasti pinnalle.
 - Kohtuullinen pakkasrasitus: Pystypinnat ulkona sekä sateelta suojatut vaakapinnat ulkona. Pinnat suojattu epätavalliselta sadeveden kastelevalta vaikutukselta huolellisin detaljein.

4. Vaatimukset ja varmuus

Vaatimuksia ja koetuloksia käsitellessä tulee aina muistaa, että betonin kaikki ominaisuudet sisältävät aina hajontaa. Siten pakkasenkestävyys ja koetulokset vaihtelevat aina hieman. Tämän tilastollisen luonteen takiahan esim. betonin lujuus arvostellaan nimellislujuutena eikä vain keskiarvolujuutena tai suoraan koetuloksena. Vastaava ajattelu tulee huomioida myös pakkasenkestävyydessä.

Yllä esitetyt ja yleensäkin vaaditut pakkasenkestävyysvaatimukset koskevat valmista rakennetta. Tässä vaatimussystematiikka poikkeaa lujuudesta, jossa lujuusluokkavaatimus koskee normikoe-kappaleita ja rakenteessa vaadittava lujuus lasketaan tästä. Tulee huomata, että esimerkiksi vaihtelu on sitä suurempaa mitä enemmän kokkappale poikkeaa lopullisesta rakenteesta. Siten esim. erikseen valmistettujen lieriöiden mitatut pakkasenkestävyydet eroavat todellisen rakenteen pakkasenkestävyydestä enemmän kuin poraamalla irrotettujen kappaleiden.

Rakennekoe-kappaleen lujuusmäärittämisessä vertailulujuudeksi riittää 0,85 kertaa lujuusluokka (rakenneluokka 1). Tämä vähennyshän johtuu siitä, että rakenteesta poratun koe-kappaleen lujuus vastaa ”todellista” rakenteen lujuutta paljon tarkemmin kuin erikseen tehdystä koe-kappaleesta määritetty lujuus. Tätä varmuuden huomioonottamista pakkasenkestävyysvaatimusten arvoissa ei vielä käytetä. Valmistajien tulee kuitenkin omassa toiminnassaan huomioida tämä. Vaatimustason nähden tulee siis olla hieman lisävarmuutta riippuen siitä, kuinka hyvin koe-kappale voi vastata lopullista rakennetta: (Lopullinen rakenne – tuotannon aikaiset kokeet – (mallielementti) – ennakkokokeet). Tämä lisävarmuus on valmistajan itse harkittava, ja tilaaja ei siitä aseta vaatimuksia.

Tarkkoja matemaattisia laskelmia tästä marginaalista ei nykyisillä lähtötiedoilla ole vielä mahdollista tehdä, joten toistaiseksi joudutaan tyytymään arvioihin ja karkeisiin laskelmiin vaatimustasojen osalta. Nykytiedoin voidaan arviona esittää vaatimukseen 10 % marginaalia ennakkokokeissa. Näin voidaan saavuttaa riittävä tilastollinen varmuus lopullisen rakenteen vaatimuksen mukaisuudesta.

Valmistajan tulee huomioida hajonta arvioidessaan omaa tuotantoaan koetulosten perusteella. Mikäli useimmiten koetulokset ovat hyvin lähellä hyväksymisrajaa, riski alitavan laadun osalta on suuri. Marginaali, jolla tulosten yleensä tulisi ylittää vaatimukset, riippuu valmistajan omasta hajonnasta. Mikäli hajonta on pieni, voidaan toimia pienemmällä marginaalilla, mutta vastaavasti hajonnan ollessa suuri tulee marginaalia kasvattaa. Vain kokeita tekemällä ja kokemuksen karttuessa valmistajat voivat asettaa oman tuotannon ohjauksen arvot omalta kannaltaan hyvälle tasolle.

5. Laadunvarmistus ja kelpoisuuden todentaminen

Betonin laadunvarmistuksen tehtävänä on valmistajan oman varmuuden saaminen siitä, että hän valmistaa vaatimukset täyttävää tuotetta. Kelpoisuuden todentamisen tekee ti-laaja saamansa informaation perusteella. Kelpoisuuden todentamisessa todetaan, että tuote täyttää asiakkaan asettamat vaatimukset.

Kelpoisuuden todentamiseen on yhteiskunta asettanut myös yleisen edun nimissä tiettyjä vaatimuksia. Nämä minimimenettelyt esitetään rakentamismääräyskokoelmassa RakMK B4.

Asiakkaan asettamia vaatimuksia laadunvarmistukselle ja tuloksille voi olla lukuisissa paikoissa; työselityksessä, viitemateriaalissa, vapaaehtoisen tarkastetun valvonnan ohjeissa yms. Yleisesti Suomessa tähän luokkaan kuuluvia vaatimuksia esitetään SFS:n tuoteryhmäohjeissa, Säilyvyysohjeessa BY 32 sekä työselityksissä.

Kelpoisuuden todentamisasiakirjoissa voidaan asettaa vaatimuksia valmistajan laadunvarmistukselle. Tällaiset vaatimukset ovat aina minimivaatimuksia, ja valmistajan tulee oman kokemuksensa ja kohteen vaativuuden perusteella harkita itse tarkempien laadunvarmistusmenetelmien ja näytteenoton käyttämistä.

6. Ennakkokokeet

Aloitettaessa massan valmistus tai otettaessa valmistusmenetelmä käyttöön tulee valmistajan riittävin ennakkokokein osoittaa, että valmistettavalla massalla ja käytettävällä valmistusmenetelmällä voidaan aikaansaada vaatimukset täyttävää tuotetta. Ennakkokokeiden tulosten tulee täyttää asetetut vaatimukset ilman yksittäisiä alituksia. Ennakkokokeissa kiinnitetään erityistä huomiota ilmahuokostuksen pysyvyyteen ja sen jakaumaan käytettävillä massoilla ja työmenetelmillä.

Ennakkokokeissa käytetystä ilmapitoisuudesta tulee vaatimustaso tuotannon aikaiselle laadunvalvonnalle ja -varmistukselle. Ennakkokokeissa ei siis tule käyttää tarpeettoman suurta huokostusta. Ennakkokokeessa käytettävän ilmapitoisuuden tulee kuitenkin olla vähintään taulukossa 1 esitetty minimiarvo.

Betonit jaetaan käyttötarkoituksensa ja käytettyjen materiaalien perusteella arvostelueriin. Arvosteluerät muodostetaan alla esitettyjen kriteerien perusteella. Ennakkokokeissa betonierän edustajana on arvosteluerään kuuluva massa. Tämä edustaja määrää paljolti arvosteluerän rajat.

Arvosteluerän (betoniperheen) kriteerit:

- Lisäaine tai lisäainekombinaatio muuttuu.
- Lisäaineannostusprosentti sementin määrästä muuttuu yli 50 %.
- Sementin luokka, tyyppi tai valmistuspaikka muuttuu (42,5, 52,2, CEM I, CEM II A, CEM II B, Suomi, SR, Valko ...).
- Lujuusluokat K35–K50 sekä >K50 jakautuvateri arvostelueriksi.
- Seosaine vaihtuu tai annostus muuttuu yli +/- 25%.
- Maksimiraekoko muuttuu 16 mm:n rajan yli (8–12 mm / 16–32 mm).
- Käytettävän pigmentin annostus muuttuu yli +/- 1 % sementin painosta.
- Pienillä, alle 1 % pigmenttiannostuksilla, massan voidaan katsoa kuuluvan värjäämättömien massojen arvosteluerään.
- Notkeus muuttuu yli 1 notkeusluokan.
- Sekoitintyyppin muuttaminen ja kiviaineksen ottopaikan vaihtaminen vaativat omat koesarjansa. Mahdollinen vaikutus huokostukseen ja pakkasenkestävyyteen tulee todeta vähintään kahdella erilaisella massalla. Mikäli vaihtuminen ei vaikuta, ei muiden massojen ennakkokokeita tarvitse uusia. Kiviaineksen mineralogisen koostumuksen tai murskeen määrän muutokset voivat vaikuttaa esim. tarvittavaan lisäaineannostukseen tai notkeuteen ja siten aiheuttaa arvosteluerän rajan ylittymisen.
- Valmistusmenetelmä tai massan pääasiallinen käyttötarkoitus muuttuu (pystyvalu, vaakavalu, lattiabetoni, seinäbetoni, pumpattava, laattamassa...).

Ennakkokokeet koostuvat kolmesta eri annoksesta tehtävistä tuoremassakokeista ja yhdestä kovettuneen betonin kokeesta.

Tuoremassakokeissa määritetään massan työstettävyys, ilmapitoisuus ja tiheys kolmesta eri valmistusannoksesta.

Elementtibetonista tehdään elementtien valmistusmenetelmittäin työselityksessä tai suunnitelmissa vaaditut pakkasenkestävyyskokeet joko irrottamalla valmiista elementistä tai valmistamalla erilliset samanrakenteiset koe-elementit, joiden koko on vähintään 1 m^2 . Koe-elementit valmistetaan samoissa olosuhteissa ja vastaavilla työmenetelmillä kuin varsinaiset elementit. Saavutettujen tulosten on täytettävä asetettu vaatimus. Vesitiiviyys määritetään erikseen valmistetuista koekappaleista.

Valmisbetonituotannossa tehdään ennakkokoe erikseen valmistetuilla soveltuvilla koekappaleilla.

Ennen valmistuksen aloitusta tulee määritellä ja dokumentoida kirjallisesti kukin valmistettava massa kuuluvaksi johonkin testattuun arvosteluerään.

Betonilaadun käyttö voidaan aloittaa tilaajan kanssa tehdyn erillisen sopimuksen perusteella ja valmistajan vastuulla ennen vaadittavan pakkasenkestävyyskokeen hyväksytyn koetuloksen saamista. Alle 20 m^3 betonimäärästä ei tarvitse tehdä omaa arvosteluerää, vaan se voidaan liittää parhaiten sopivaan toiseen arvosteluerään.

7. Jatkuvan tuotannon valvonta

Uusintakokeet

Jatkuvassa tuotannossa tulee vähintään puolivuositain tehdä uusintakokeet toistamalla ennakkokokeissa tehdyt. Jatkuvan tuotannon kokeina voidaan käyttää tuotannosta otettujen kohdekohtaisten tai muiden erikseen tehtyjen kokeiden tuloksia. Jos kaksi peräkkäistä uusintakoetta on täyttänyt vaatimukset täysimääräisinä, voidaan uusintatiheys puolittaa ja tehdä kokeet kerran vuodessa. Jos taas kerran vuodessa tehtävissä uusintakokeissa ilmenee yksittäisiäkin alittavia tuloksia, tulee uusintakokeiden väli palauttaa puoleksi vuodeksi.

Uusintakokeissa tehdään joka toinen kerta kokeet muista arvosteluerän massoista, kuin erän edustajaksi oli valittu. Joka toinen kerta tulee kokeet kuitenkin tehdä erän edustavasta massasta. Näiden kahdenlaisten kokeiden perusteella nähdään, että

- arvosteluerää edustava massa pysyy muuttumattomana ja sen pakkasenkestävyys haluttuna
- valittu massa kuvaa koko arvosteluerää.

Yksittäistä koetta arviointiin käytettäessä sen tulee täyttää vaatimukset täysimääräisenä. Käytettäessä arviointiin useampia kokeita niiden keskiarvon tulee täyttää vaatimukset ja korkeintaan yksi tulos kolmesta saa alittaa vaatimuksen korkeintaan taulukossa 3 esitetysti.

Ilmapitoisuusvaatimus muuttuu uusinta-kokeissa käytetyksi, mikäli käytetty yli 10 % suurempaa kuin vanha vaatimus. Mikäli ilmapitoisuusvaatimusta halutaan laskea tulee uusintakokeet tehdä kuten ennakkokokeet.

Taulukko 3. Hyväksymisrajat.

Testaus	Hyväksymisraja
Ilmapitoisuus	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta alittaa $\leq 0,8$ %-yks., mutta aina yli taulukkojen 1 tai 2 minimi
Suojahuokossuhde	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta alittaa < 15 %
Huokosjako	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta ylittää < 15 %
Jäädytysulatuskoe	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta alittaa vaatimuksen < 20 %
Sementtimäärä	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta alittaa ≤ 10 kg/m ³
Vesi-sementtisuhde	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta ylittää $\leq 0,02$
Vesitiivisyys	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta ylittää vaatimuksen < 20 %

Päivittäinen valvonta

Ilmamäärä mitataan päivittäin jokaisen arvosteluerän (betoniperheen) annoksista niin monta kertaa tarvittaessa suhteitusta korjaten, että saadaan kaksi peräkkäistä hyväksyttävää tulosta. Tämän lisäksi mitataan ilmamäärä aina otettaessa massanäyte kovettu-neella betonilla tehtäviä kokeita varten. Massoja, joiden tulokset alittivat vaatimukset, ei saa käyttää säilyvyysvaatimusten alaisiin rakenteisiin.

Valujakson maksimipituus on työvuoron pituus. Tämän pitemmän valu- ja valmistus-jakson jälkeen ilmamäärämittaukset tulee uusaa arvosteluerittäin (betoniperheittäin). Näiden toistojen tarkoituksena on valvoa materiaalien muuttumisen vaikutusta tuotan-non aikana.

8. Toiminta epätydyttävän laadun ilmetessä

Mikäli kokeiden tulosten perusteella tai muusta syystä on syytä epäillä betonin vaatimuksenmukaisuutta, voidaan asia selvittää riittävän laajoin uusintakokein tai lisäkokein. Pakkaskestävyyden tarkistusmenettely tulee sopia tilaajan kanssa. Kokeet tulee kohdistaa alueelle, jolla epäillään epätydyttävää laatua. Jos siis epäillään koko erää (esim. kohteen kaikkia elementtejä), tulee kokeet kohdistaa tasaisesti koko erän alueelle. Jos taas epäillään vain yhtä tuotetta, tulee kokeet tällöin kohdistaa vain tähän tuotteeseen.

Yksittäisen pienen alituksen merkitystä voidaan selvittää uusintakokein. Uusintakokeissa tehdään lisää vastaavia kokeita kuin epäilyttävän tuloksen antanut koe. Tällöin selvittää, onko kyseessä vain tilastollinen normaali poikkeama keskiarvosta vai onko nimellisarvo vaatimuksen alittava. Mikäli yksittäinen koetulos alittaa vaatimuksen enemmän kuin taulukko 3 sallii, kelpoisuutta ei voi osoittaa uusintakokein.

Lisäkokein jotakin tarkempaa pakkaskestävyyden määritysmenetelmää käyttäen voidaan tarkistaa tilaajan suostumuksella rakenteen pakkaskestävyys, mikäli ensisijaiset kokeet osoittavat epäilyttävää laatua. Lisäkokeita tulee tehdä aina vähintään kolme. Tässä ohjeessa esitetyt kokeet voidaan tarkkuutensa perusteella asettaa seuraavaan järjestykseen epätarkimmasta tarkimpaan: tuoremassan ilmapitoisuus, suojahuokoskoe, huokosjako, suora pakkaskoe.

Vaatimustasona käytetään taulukkojen 1 tai 2 arvoja. Hyväksymisrajana käytetään taulukossa 3 esitettyjä kriteerejä. Suoran pakkaskestävyyskokeen vaatimustasot 50 vuoden suunnittelukäyttöä varten esitetään taulukossa 4. Hyväksymiskriteereinä kokeissa käytetään ankan ja kohtuullisen pakkasrasituksen luokissa jäädytys-sulatuskokeessa olleen koekappaleen taivutus-, veto- tai halkaisulujuuden laskua korkeintaan 2/3:aan vesi-säilytettyjen vertailukoekappaleiden vastaavista arvoista (SFS 5443, SFS 5444, SFS 5445). Koekappaleissa ei saa olla silmin havaittavaa rapautumista, eikä mahdollisesti mitattu ultraäänen nopeus saa laskea alle 2/3:aan kokeen aikana. Suolapakkaskokeena käytetään standardin SFS 5449 mukaista koetta. Hyväksymiskriteerinä käytetään tilavuudenmuutosta. Suurin sallittu tilavuudenmuutos pakkas-suolakokeessa 50 kierroksen jälkeen on 5 %. Suolapakkaskokeena voidaan myös käyttää standardin SS 13 72 44 (Borås-menetelmä) mukaista koetta. Borås-kokeessa tulee saavuttaa hyväksyttävä tulos standardissa esityillä kriteereillä.

Pakkaskestävyyden tarkistusmenettelystä tulee sopia tilaajan kanssa. Tilaajan ei tule aiheettomasti vaikeuttaa varmistamista esimerkiksi vaatimalla lisäkokeita, vaikka uusintakokeet riittäisivät.

Valmistajan tulee informoida tilaajaa viivytyksettä havaitessaan epättydyttävään laatuun viittaavia koetuloksia tai, kun hänellä on muuten perusteltu syy epäillä tuotteen vaatimuksenmukaisuutta. Näin korjaaviin toimenpiteisiin ja vaatimuksenmukaisuuden osoittamiseen jää mahdollisimman paljon aikaa.

Taulukko 4. Suoran pakkasenkestävyyskokeen vaatimustasot eri rasitusluokissa 50 vuoden suunnittelukäyttöiällä.

	Suola-pakkasrasitus	Ankara pakkasrasitus	Kohtuullinen pakkasrasitus
Pakkaskoe	Pakkas-suolakestävyys 50 sykliä SFS 5449 (56 sykliä SS 13 72 44)	Jäädytys-sulatuskoe 300 sykliä SFS 5447	Jäädytys-sulatuskoe 100 sykliä SFS 5447

Liite B

Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen Rakennuttajan laadunvarmistusohje

1. Johdanto	3
2. Tausta	4
3. Vaatimukset	5
4. Laadunvalvonnan seuraaminen	8
5. Laadunvarmistuksen pistokokeet	9
6. Toiminta epätydyttävän laadun ilmetessä	10



1. Johdanto

Tämä työraportti on jatkoa VTT Rakennustekniikassa tehdylle ”Betonin pakkasenkestävyyden varmistus” -tutkimuksen betonin ja elementtien valmistajien laadunvalvonta-ohjeelle. Raportissa esitetään ehdotus rakennuttajan pakkasenkestävyyden laadunvarmistuksen järjestämisestä sekä elementti- että paikallarakennetuissa talonrakennuksen rakenteissa. Raportin sisältö on ehdotus ja saattaa vaatia ohjeeksi edetäkseen vielä muotoilua.

Tässä raportissa esitetään ehdotus laadunvalvonnan periaatteista sekä käytettävistä hyväksymismenettelyistä ja -kriteereistä. Uutta ehdotuksessa on betonien jakaminen käyttötarkoituksensa ja käytettyjen materiaalien perusteella arvostelueriin sekä betonirakenteiden jakaminen kolmeen pakkasrasitusluokkaan. Kullekin luokalle esitetään hyväksymiskriteerit Samoin uutta on kahden suunnittelukäyttöiän (50 ja 100 vuotta) huomioiminen pakkasrasitetuissa rakenteissa.

2. Tausta

Tässä ohjeessa käsitellään pääsääntöisesti sellaisia talonrakennuksen rakenteita, jotka kuuluvat Betoninormien mukaiseen luokkaan Y2. Tällaisille pakkasrasitetuille rakenteille suunnittelija selvittää tarpeelliset vaatimukset pakkasenkestävyydelle ja merkitsee ne piirustuksiin. Julkisivubetonille asetetaan aina pakkasenkestävyysvaatimus.

Tämän ohjeen mukaan toimittaessa suunnittelija valitsee rasitusluokan rakenteelle ja vaatimukset tulevat sitten tämän ohjeen vaatimustaulukoista. Suunnittelijan ei tarvitse itse määrittää vaatimuskokeita ja vaatimuksenmukaisuuden arvioitkriteerejä, vaan ne saadaan suoraan tästä ohjeesta.

Tässä ohjeessa esitetään vaatimukset sekä 50 että 100 vuoden suunnittelukäyttöiälle. Standardin ENV 1991-1 mukaan nämä suunnittelukäyttöiät on tarkoitettu käytettäväksi tavallisilla (50 vuotta) tai tavallista kalliimmilla tai vaativampiin (100 vuotta) rakennuksiin ja rakenteisiin.

Betoninormien mukaan pakkasenkestävyyden saavuttamiseksi riittää yleensä suojahuokossuhteelle asetettu vaatimus 0,20. Betonin lujuusluokan tulisi olla betoninormien mukaan $\geq K40$. Jos suojabetonikerrosta kasvatetaan, voidaan lujuusluokka laskea K30:een (normin taulukko 4.2) Tällöin suojabetonikerros on Y2-luokassa jo 35 mm. Normaalisti tässä luokassa riittää 25 mm. Lujuuden osalta on käytännöksi jo muodostunut muiden ohjeiden (esim. BY 32) vaatimukseksi lujuudelle K35–K45.

Suunnittelijan tulee ennen tätä ohjetta siis määritellä sekä pakkasenkestävyyden arvostelukoe että arvosteluraja. Suojahuokossuhdekoe on normien ehdotus tai esimerkki. Muita mahdollisia kokeita ovat suora jäädytys-sulatuskoe, jonka vaatimuksena on esim. taivutus- tai halkaisulujuuden korkeintaan 33 %:n lasku, suolapakkaskoesekä hieanalyysi, jonka huokosjako on 0,20–0,30 mm.

Tutkittaessa vaatimustason asettamista ilmahuokosparametreille on todettu, että pakkasenkestävyyden kannalta merkittävien betonin huokostusta kuvaavista suureista on huokosjako. Itse ilmapitoisuus tai suojahuokossuhde eivät sinänsä suoraan kuvaa huokostuksen tehokkuutta. Ne tietenkin korreloivat huokosjaon ja siten myös pakkasenkestävyyden kanssa, mutta tarkkuudeltaan heikommin kuin huokosjako. Tämän takia tulee-kin erityisesti hyvää pakkasenkestävyyttä ja suurta varmuutta haettaessa harkita huokosjaon suuruuden perusteella tehtävää kelpoisuuden arvostelua.

3. Vaatimukset

Suunnittelija asettaa vaatimukset rakenteiden betonin pakkasenkestävyydellen. Eri rakenteisiin kohdistuvat erisuuret pakkasrasitukset ja eri rakenteille suunniteltava eripitkä käyttöikä, tulee huomioida vaatimusta asettaessa. Tässä ohjeessa rasitukset jaetaan kolmeen luokkaan: suola-pakkasrasitukseen, ankaraan pakkasrasitukseen ja kohtuulliseen pakkasrasitukseen. Suunnittelukäyttöiät 50 ja 100 vuotta käsitellään tässä ohjeessa. Suunnittelija määrittelee rakenteen rasitusluokan ja suunnittelukäyttöiän. Ylensä suunnittelijan ei tarvitse määrittää tarkkaa arvostelukoetta tai arvostelukriteerejä. Riittää, että hän viittaa näihin ohjeisiin. Vain erityisistä syistä voi olla tarvetta erikseen määrittää kohdekohtaiset arvostelukriteerit.

Mikäli tavoitellaan tästä ohjeesta poikkeavaa käyttöikää, tulee määrittää kohdekohtaiset arvostelurajat. Tällöin suunnittelijan tulee käyttöikämitoituksen ja riittävän ammattitaiton avulla asettaa sopivat rajat.

Tämän ohjeen mukaisesti toimittaessa asetetaan betonin pakkasenkestävyysvaatimus taulukkojen 1 ja 2 rasitusluokituksena. Arvostelussa käytetään taulukoiden 1 ja 2 arvoja. Tällöin ennakkokokeiden tarve ei kasva kohtuuttomaksi. Tarkemman kokeen käyttäminen pakkasenkestävyyden toteamiseen voidaan tällöin tehdä käyttäen taulukoiden arvoja.

Suunnittelija määrittää siis rakenteen kuuluvan esim. tämän ohjeen mukaiseen ankan pakkasrasituksen luokkaan: ”Ohjeen Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen, ankan pakkasrasituksen luokka, suunnittelukäyttöikä 50 vuotta”. Tällöin laadunvalvonnassa ja laadunvarmistuksessa käytetään taulukon 1 keskimmäisen sarakkeen arvoja. Pakkaskokeista tehdään joko suojahuokoskoe tai huokosjako. Molempia ei tarvitse tehdä.

Taulukko 1. Vaatimustasot erilaisissa rasituksissa 50 vuoden suunnittelukäyttöiällä.

	Suola- pakkasrasitus	Ankara pakkasrasitus	Kohtuullinen pakkasrasitus
Minimi sementtimäärä kg/m ³ 2)	300	280	280
Maksimi vesi-sementtisuhte	0,50	0,55	0,60
Ilmamäärä % 1), SFS 5287	5,0–7,0	4,0–6,0	3,5–5,5
Minimi lujuusluokka 3)	K35	K35	K35
Suojahuokossuhde, SFS 4475	(0,25)	0,25	0,20
Huokosjako mm, VTT TEST R003-00	0,20	0,23	0,27
Vedenpitävyys, SFS 4476	Vaaditaan	Vaaditaan	Ei vaadita

Taulukko 2. Vaatimustasot erilaisissa rasituksissa 100 vuoden suunnittelukäyttöiällä.

	Ankara pakkasrasitus	Kohtuullinen pakkasrasitus
Minimi sementtimäärä, kg/m ³ 2)	280	280
Maksimi vesi-sementtisuhte	0,50	0,55
Ilmamäärä % 1), SFS 5287	5,0–7,0	4,0–6,0
Minimi lujuusluokka 3)	K40	K40
Suojahuokossuhde, SFS 4475	0,26	0,24
Huokosjako mm, VTT TEST R003-00	0,22	0,25
Vedenpitävyys, SFS 4476	Vaaditaan	Ei vaadita

- 4) Ilmamäärävaatimus on ohjeellinen ja tarkoitettu tuotannon aikaiseen valvontaan. Tarkka tuotannon vaatimustaso saadaan ennakkokokeista. Arvot koskevat ≥ 16 mm maksimirunkoaineista betonia. Mikäli maksimi runkoaine on 12 mm, lisätään vaatimuksia +0,3 %-yksikköä ja 8 mm runkoaineella + 0,6 %-yksikköä.
 - 5) Sementtimäärä koskee CEM I ja CEM II A -sementtejä. CEM II B -sementillä vaatimusta korotetaan 10 %.
 - 6) Raudoituksen suojabetonikerroksen ja korroosiokeston salliessa lujuusvaatimus on tämä, muuten K45. Lujuusvaatimus siis sama kuin BY 32.
- Suolapakkasrasitus: rakenteeseen kohdistuu suolan ja pakkasen yhtäaikainen rasitus, Ulkoportaot jne.
 - Ankara pakkasrasitus: Betoni voi jäätyä märkänä. Vaakarakenteet ulkona, hyvin märät pystypinnat esimerkiksi meren rannassa; pystyrakenteen kohdat, joissa esim. sadevesi kerääntyy voimakkaasti pinnalle.
 - Kohtuullinen pakkasrasitus: Pystypinnat ulkona sekä sateelta suojatut vaakapinnat ulkona. Pinnat suojattu epätavalliselta sadeveden kastelevalta vaikutukselta huolellisin detaljein.

Betonin sementtimäärän ja vesi-sementtisuhteen arvot saadaan valmistuksen aikaisista punnitusraporteista.

Tässä raportissa esitetyt kokeet voidaan tarkkuutensa perusteella asettaa seuraavaan järjestykseen epätarkimmasta tarkimpaan: tuoremassan ilmapitoisuus, suojahuokoskoe, huokosjako, suora pakkaskoe. Tarkemmalla menetelmällä voidaan aina osoittaa pakkasenkestävyys.

Suola-pakkasrasitetuissa rakenteissa ja ankaran pakkasrasituksen alaisissa rakenteissa ei suojahuokosvaatimuksen käyttöä pakkasenkestävyyden arvosteluun suositella. Suojahuokosvaatimuksesta tulee muistaa se, ettei suojahuokoskoe sovellu korkeiden lujuusluokkien betoneille. Koeteknisesti kokeen soveltamisala loppuu ainakin yli K50 betoneilla. Koe soveltuu paremmin lujuusluokille K20–K35. Korkeammilla lujuusluokilla kuin K 50 tulee aina todeta pakkasenkestävyysvaatimuksen täyttyminen joko huokosjakona tai suorana pakkasenkestävyyskokeena.

4. Laadunvalvonnan seuraaminen

Tilaajan tulee vaatia betonin tai elementin valmistajan noudattavan ohjeessa ”Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen, Pakkasenkestävyyden laadunvalvonta” esitettyä laadunvalvontamenettelyä. Ohjeessa on esitetty yksityiskohtaisesti betonien jakaminen arvostelueriin sekä arvostelueriin kohdistettavan laadunvalvonnan laajuuden minimimäärät.

Betonit jaetaan käyttötarkoituksensa ja käytettyjen materiaalien perusteella arvostelueriin. Kustakin arvosteluerästä tehdään ennakkokokeet, uusintakokeet 1 tai 2 kertaa vuodessa sekä päivittäisen valvonnan mukaiset kokeet.

Tilaaja vaatii valmistajalta selvityksen kohteessa käytettyjen betonien arvosteluerien (betoniperheiden) laadunvalvontakokeiden järjestämisestä sekä yhteenvedon tehdyistä kokeista. Tilaajan toimesta laadunvalvonnan toteutumista voidaan seurata tehdaskäynnillä ja/tai kokeiden tulosten tarkastelulla.

5. Laadunvarmistuksen pistokokeet

Tavoitteena on, että rakenteiden kelpoisuuden todentaminen voidaan tehdä valmistajan laadunvalvonnan kuvauksen sekä siitä saatavien tulosten perusteella. Rakennuttaja voi kuitenkin harkinnan mukaan teettää valmiista elementeistä tai rakenteesta pistokoe-luontoisia tarkistusmittauksia.

Pistokokeiden määrä tulee harkita tapauskohtaisesti, mutta ohjeellisesti voi esittää, että voidaan varautua tekemään jokaisesta betonityypistä yksi koe. Samoin kaikista erilaisista elementtityypeistä voidaan varautua tekemään pistokokeet.

Pistokokeina tehtäväksi kokeeksi soveltuu parhaiten hieestä tehtävä huokosjakokoe. Tällöin yhtä koetulosta kohden riittää kahden halkaisijaltaan 50 mm:n lieriön poraaminen. Mikäli betonielementti on tehty ns. kaksikerrosvaluna, tarvitaan 75 mm:n lieriöt. Mikäli halutaan käyttää suojahuokoskoetta pistokokeena, joudutaan poraamaan yhtä koetulosta kohden yleensä 2–3 kpl halkaisijaltaan 100 mm:n lieriöitä. Mikäli taas betonielementti on valettu kaksikerrosvaluna, tulee tällöin riittävän tilavuuden aikaansaamiseksi sekä pinta- että pohjabetonia porata kaksinkertainen määrä lieriöitä koetta kohden. (Lieriöt tulee katkaista pinta- ja pohjabetonin erottamiseksi.)

Yhden koetuloksen perusteella ei voi tehdä arviota kohteen betonin kelpoisuudesta mutta voidaan osoittaa jatkokokeiden tarpeellisuus. Mikäli pistokokeet osoittavat alittavaa laatua, toimitaan kohdassa 5 esitettävien periaatteiden mukaisesti.

Koetulosten vaatimusrajat esitetään taulukoissa 1 ja 2.

6. Toiminta epätydyttävän laadun ilmetessä

Mikäli kokeiden tulosten perusteella tai muusta syystä on syytä epäillä betonin vaatimuksenmukaisuutta, voidaan asia selvittää riittävän laajoin uusintakokein tai lisäkokein. Pakkaskestävyyden tarkistusmenettely tulee sopia tilaajan ja valmistajan kesken. Kokeet tulee kohdistaa alueelle, jolla epäillään epätydyttävää laatua. Jos siis epäillään koko erää (esim. kohteen kaikkia elementtejä), tulee kokeet kohdistaa tasaisesti koko erän alueelle. Jos taas epäillään vain yhtä tuotetta, kokeet kohdistetaan vain tähän tuotteen.

Yksittäisen pienen alituksen merkitystä voidaan selvittää uusintakokein. Uusintakokeissa tehdään lisää vastaavia kokeita kuin epäilyttävän tuloksen antanut koe. Tällöin selviää, onko kyseessä vain tilastollinen normaali poikkeama keskiarvosta vai onko nimellisarvo vaatimuksen alittava. Mikäli yksittäinen koetulos alittaa vaatimuksen enemmän kuin taulukko 3 sallii, kelpoisuutta ei voi osoittaa uusintakokein.

Taulukko 3. Hyväksymisrajat.

Testaus	Hyväksymisraja
Ilmapitoisuus	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta alittaa $\leq 0,8$ %-yksikköä, mutta aina yli taulukon 1 minimin.
Suojahuokossuhde	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta alittaa < 15 %.
Huokosjako	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta ylittää < 15 %.
Jäädytyskulatuskoe	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta alittaa vaatimuksen < 20 %.
Sementtimäärä	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta alittaa ≤ 10 kg/m ³ .
Vesi-sementtisuhde	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta ylittää $\leq 0,02$.
Vesitiiviys	Keskiarvo OK. Yksi kolmesta ylittää vaatimuksen < 20 %.

Lisäkokein jotakin tarkempaa pakkaskestävyyden määrittämenetelmää käyttäen voidaan tarkistaa tilaajan ja valmistajan yhteisellä suostumuksella rakenteen pakkaskestävyys, mikäli ensisijaiset kokeet osoittavat epäilyttävää laatua. Lisäkokeita tulee tehdä aina vähintään kolme. Tässä raportissa esitettävät kokeet voidaan tarkkuutensa perusteella asettaa seuraavaan järjestykseen epätarkimmasta tarkimpaan: tuoremassan ilmapitoisuus, suojahuokoskoe, huokosjako, suora pakkaskoe.

Vaatimustasona käytetään taulukon 1 tai 2 arvoja. Hyväksymisrajana käytetään taulukossa 3 esitettyjä kriteerejä. Suoran pakkaskestävyyden vaatimustasot 50 vuoden

suunnittelukäyttöä esitetään taulukossa 4. Hyväksymiskriteereinä kokeissa käytetään ankaran ja kohtuullisen pakkasrasituksen luokissa jäädytys-sulatuskokeessa olleen koekappaleen taivutus-, veto- tai halkaisulujuuden laskua korkeintaan 2/3:aan vesisäilytetyjen vertailukoekappaleiden vastaavista arvoista (SFS 5443, SFS 5444, SFS 5445). Koekappaleissa ei saa olla silmin havaittavaa rapautumista eikä ultraäänen nopeus saa laskea alle 2/3:n kokeen aikana.

Suolapakkaskokeena käytetään standardin SFS 5449 mukaista koetta. Hyväksymiskriteerinä käytetään tilavuudenmuutosta. Suurin sallittu tilavuudenmuutos pakkas-suolakokeessa 50 kierroksen jälkeen on 5 %. Suolapakkaskokeena voidaan myös käyttää standardin SS 13 72 44 (Borås-menetelmä) mukaista koetta. Borås-kokeessa tulee saavuttaa hyväksyttävä tulos standardissa esityillä kriteereillä.

Pakkasenkestävyyden tarkistusmenettelystä tulee sopia tilaajan ja valmistajan kesken. Tilaajan ei tule aiheettomasti vaikeuttaa varmistamista esimerkiksi vaatimalla lisäkokeita, vaikka uusintakokeet riittävät.

Tilaajan tulee informoida valmistajaa viivytyksettä epäillessään epätyytyttävään laatuun viittaavia koetuloksia tai hänellä on muuten perusteltu syy epäillä tuotteen vaatimuksenmukaisuutta. Näin korjaaviin toimenpiteisiin ja vaatimuksenmukaisuuden osoittamiseen jää mahdollisimman paljon aikaa.

Taulukko 4. Suoran pakkasenkestävyyssuorituksen vaatimustasot eri rasisitusluokissa 50 vuoden suunnittelukäyttöä varten.

	Suola-pakkasrasitus	Ankara pakkasrasitus	Kohtuullinen pakkasrasitus
Pakkaskoe	Pakkas-suolakestävyys 50 sykliä SFS 5449 (56 sykliä SS 13 72 44)	Jäädytys-sulatuskoe 300 sykliä SFS 5447	Jäädytys-sulatuskoe 100 sykliä SFS 5447



Tekijä(t) Leivo, Markku			
Nimeke Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus			
Tiivistelmä Suomessa on herännyt kiiwas keskustelu betonien pakkasenkestävyydestä ja sen varmistamisesta, käytettävistä laadunvarmistusmenettelyistä, laadunvalvontamenetelmistä sekä käytettävistä arvostelurajoista. Toisaalta sekä valmistajilla että tilaajilla on epätietoisuutta siitä, ovatko vaatimukset realistisia, sekä siitä, minkälainen valvontasystematiikan tulisi olla. Valmistajilla tulisi olla menetelmät ja menettelyt, joiden avulla he voisivat varmistaa oman tuotantonsa vaatimuksenmukaisuuden riittävän varmasti. Tilaajalla tulisi toisaalta olla mahdollisuus halutessaan varmistaa vaatimuksenmukaisuus. Näiden kaikkien menettelyjen ja menetelmien tulisi olla yhteismitallisia sekä kohdistua oikeaan ominaisuuteen. Tässä julkaisussa selvitetään keinoja vastata näihin vaatimuksiin.			
Avainsanat concrete, frost resistance, low temperature, quality control, requirements, tests, test methods			
Toimintayksikkö VTT Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5690-9 (nid.) 951-38-5691-7 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinnumero R9SU00412	
Julkaisu-aika Syyskuu 2000	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 13 s. + liitt. 25 s.	Hinta A
Projektin nimi Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Rakennustuoteteollisuus ry (RTT), Betoniteollisuuden laaduntarkastus ry (BLT), Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 4561
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2047
VTT-TIED-2047

Author(s) Leivo, Markku			
Title Ensuring concrete frost resistance Part 2. Quality control and requirements			
Abstract In Finland, blazing conversation has started on the frost resistance of concrete: how to ensure it, used quality control procedures, quality control tests and used acceptance criterion. On the other hand, manufacturers and customers are unsure if the requirements are realistic and how the quality control should be done. The manufacturer needs procedures and tests which ensure that his own production is as required with a reasonable certainty. The customer also needs a method to control that the product is as required. All of these procedures and requirements should be in-line with each other and aim at the right property. In this report we try to answer these demands.			
Keywords concrete, frost resistance, low temperature, quality control, requirements, tests, test methods			
Activity unit VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology, Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5690-9 (soft back ed.) 951-38-5691-7 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number R9SU00412	
Date September 2000	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 13 p. + app. 25 p.	Price A
Name of project Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen		Commissioned by The National Technology Agency (Tekes), The Finnish Association of Construction Products Industries (RTT) Betoniteollisuuden laaduntarkastus ry (BLT), Technical Research Centre of Finland (VTT)	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – MEDDELANDEN – RESEARCH NOTES

VTT RAKENNUSTEKNIikka – VTT BYGGNADSTEKNIK – VTT BUILDING TECHNOLOGY

- 1958 Mustakallio, Panu, Kosonen, Risto, Laitinen, Ari & Shemeikka, Jari. Matalalämpötilainen vesikierto-
inen lämmitysjärjestelmä. 1999. 36 s.
- 1959 Myllymäki, Jukka & Baroudi, Djébar. Prediction of smoke production and heat release by convolution
model. NORDTEST Technical report 1297-96. 1999. 29 p.
- 1963 Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Eristyslasin täytekaasun ja lasien toimivuus ja toteaminen. 1999.
43 s.
- 1964 Rämö, Johanna & Ylä-Sulkava, Tuula. Sisusteiden paloturvallisuus. 1999. 30 s. + liitt. 2 s.
- 1967 Kärki, Satu & Karjalainen, Sami. Ilmastointijärjestelmän vikadiagnostiikka. Menetelmät ja sovellukset.
1999. 92 s. + liitt. 2 s.
- 1968 Kokko, Erkki, Kosonen, Risto, Hyttinen, Hannu, Hakulinen, Petri & Pyykkö, Antti. Sellukuitueristetty
matalaenergiapientalo. 1999. 53 s.
- 1979 Nieminen, Jyri & Kouhia, Ilpo. Hyvin eristetyn loivan katon toimivuus ja vaatimukset. 1999. 38 s. +
liitt. 3 s.
- 1981 Hakkarainen, Tuula (ed.) Smoke gas analysis by Fourier transform infrared spectroscopy. The SAFIR
project. 1999. 81 p.
- 1988 Lahdenperä, Pertti. Ajatuksia ST-urakasta. Suomalaisen suunnittelu ja toteutus -menettelyn kehittämi-
nen amerikkalaisten oppien pohjalta. 1999. 40 s. + liitt. 2 s.
- 1990 Keski-Rahkonen, Olavi & Björkman, Jouni. Palotilastoja Suomesta ja ulkomailta toiminnallisten
palosäädösten perusteiksi. 1999. 56 s.
- 1991 Kokko, Erkki, Ojanen, Tuomo, Salonvaara, Mikael, Hukka, Antti & Viitanen, Hannu. Puurakenteiden
kosteustekninen toiminta. 1999. 160 s.
- 1994 Leppänen, Pekka, Pulakka, Sakari, Saari, Mikko & Viitanen, Hannu. Life-cycle-cost optimised wooden
multi-storey apartment building. Nordic Wood, Phase 2, Project P-2. Final report. 1999. 73 p.
- 1997 Jokinen, Petri, Lahtinen, Reima & Lehmus, Eila. Teräsrakenteiden suojaus kaariruisikutetulla sinkkipin-
noitteella. 1999. 50 s. + liitt. 14 s.
- 2001 Haakana, Maarit & Soitinaho, Ulla. Kiinteistönhoitohenkilöstön motivointi energiansäästöön. Koke-
mukset koulukohteista. 1999. 43 s. + liitt. 14 s.
- 2002 Andstén, Tauno, Juutilainen, Hemmo, Vaari, Jukka & Weckman, Henry. Test method for actuating and
safety devices of portable fire extinguishers. Nordtest Project No. 1435-99. 1999. 40 p. + app. 25 p.
- 2003 Vainio, Terttu, Riihimäki, Markku & Mäkelä, Pekka. Rakennuskustannusindeksi 2000. 1999. 70 s. +
liitt. 2 s.
- 2005 Baroudi, Djébar, Kokkala, Matti & Weckman, Henry. Savuilmaisimien toiminta-aikojen laskenta-
ohjelma PALDET 2.1S. 1999. 37 s. + liitt. 1 s.
- 2013 Tillander, Kati & Keski-Rahkonen, Olavi. Palokunnan saatavuuden merkitys rakennuksen paloriski-
tarkastelussa. 2000. 213 s. + liitt. 55 s.
- 2025 Riihimäki, Markku & Lehtinen, Erkki. Talopakettien asuinrakentamisessa. Valmisosien yleisyys toimituk-
sissa. 2000. 44 p.
- 2027 Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo, Lindberg, Liisa & Kokkala, Matti. Vyöhykemalliohjelman CFAST-
kelpoisuuden arviointi. 2000. 51 s. + liitt. 14 s.
- 2028 Kokkala, Matti. Rakennusten paloturvallisuussuunnittelu. Toiminnallinen lähestymistapa. 2000. 63 s. +
liitt. 15 s.
- 2029 Helenius, Antti. Shear strength of clinched connections in light gauge steel. 2000. 40 p. + app. 13 p.
- 2030 Rantamäki, Jouko, Kääriäinen, Hannu, Tulla, Kauko, Viitanen, Hannu, Kalliokoski, Pentti, Keskipuru,
Timo, Kokkoti Helmi & Pasanen, Anna-Liisa. Rakennusten ja rakennusmateriaalien homeet. 2000. 40 s.
+ liitt. 6 s.
- 2047 Leivo, Markku. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen. Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus.
2000. 13 s. + liitt. 25 s.