

# Betonin säilyvyyden kenttätutkimukset – merkitys ja tuloksia

Hannele Kuosa & Erika Holt

Teknologian tutkimuskeskus VTT

| Perustietoja betonin säilyvyyden koekentistä Suomessa <sup>1)</sup> | Kotka<br>Tienvierus-<br>kenttä (VT 7) | Espoo | Sodankylä |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------|-----------|
| Pakkasrasitus - XF3 <sup>2)</sup>                                   | -                                     | X     | X         |
| Pakkas-suolarasitus - XF4 <sup>2)</sup>                             | X                                     | -     | -         |
| Karbonatisoituminen:                                                |                                       |       |           |
| Katettu ulkotila – XC3 <sup>2)</sup>                                | -                                     | X     | -         |
| Ulkotila sateelle alttiina – XC4 <sup>2)</sup>                      | X                                     | X     | X         |
| Kloridien tunkeutuminen, tieolosuhde - XD3 <sup>2)</sup>            | X                                     | -     | -         |
| Oma sääasema                                                        | X                                     | (X)   | -         |
| Korkeusasema meren pinnasta [m]                                     | 20                                    | 20    | 179       |
| Ilmastotietoja (keskiarvo 1971 - 2000):                             | Helsinki (Kaisaniemi)                 |       | Sodankylä |
| Vuoden keskilämpötila [°C]                                          | 6                                     |       | -1        |
| Tammikuun keskilämpötila [°C]                                       | -4                                    |       | -14       |
| Kesäkuun keskilämpötila [°C]                                        | 15                                    |       | 12        |
| Keskilämpötila alle 0 °C [päivää/vuosi]                             | 169                                   |       | 230       |
| Keskilämpötila alle -10 °C [päivää/vuosi]                           | 40                                    |       | 111       |
| Suhteellinen kosteus, vuoden keskiarvo [%]                          | 79                                    |       | 62        |
| Sademäärä, vuoden keskiarvo [mm]                                    | 642                                   |       | 507       |
| Projektit ja betonimassat (tai pintakäsittely):                     |                                       |       |           |
| Duralnt perussarja (2007...)                                        | 30                                    | 23    | -         |
| Duralnt lisämassat I (2008...)                                      | 4                                     | -     | -         |
| Duralnt lisämassat II (2009...)                                     | 6                                     | -     | -         |
| Finnsementti (2010...)                                              | 10                                    | -     | -         |
| Finnsementti (2011...)                                              | 4                                     | -     | -         |
| CONLIFE-projekti (2001...)                                          | -                                     | -     | 22        |
| YmpBeton-projekti (2003...)                                         | -                                     | 19    | 19        |

1) Lisäksi erityisesti Ruotsin Boråsin tienvieruskoekenttä (1996...), jossa myös suomalaisia sideineita ja betoneja/koekappaleita.

2) Rasitusluokat SFS-EN 206-1/BY 50.

Betonin säilyvyyden kenttätutkimukset tarkoittavat luonnonmukaisissa rasitusolosuhteissa tarkoin kokeellisin mittauksin ja analyysin tehtävää vaurioitumisen pitkäaikaisseurantaa. Oleellista on, että kenttämittauksia jatketaan riittävän pitkään, vähintään 20 vuotta. Tarkan lähtö- ja mittaustiedon sekä muun dokumentaation kuten käytettyjen tutkimusmenetelmien pysyvä tallentaminen on myös tärkeää. Vasta riittävän pitkän ajan kuluessa kenttätutkimuksista on saatavissa paras hyöty ja luotettavin tulos. Kenttätutkimuksiin sisältyy aina myös tulosten analysointia ja hyödyntämistä.

Suomessa on tällä hetkellä noin 90 betoni-koostumusta kolmella eri säilyvyystutkimuksen koekentällä. Ensimmäinen betonikoesarja vietiin Sodankylän koekentälle joulukuussa 2001 ja viimeisimmät koekappaleet vietiin Kotkan tienvieruskoekentälle marraskuussa 2011. Suomen kolmas eli Espoon koekenttä edustaa Suomen tiheästi rakennettua eteläistä ja lähellä rannikkoa sijaitsevaa aluetta ja ilmastotyyppiä. Suomen säilyvyystutkimuksessa käytetään myös Ruotsissa Boråsin tienvieruskoekentällä sijaitsevista koekappaleista saatavia kenttätutkimustuloksia. Ruotsissa on myös suomalaisia sementtejä sisältäviä betoneja sekä myös täysin samoja betoneja kloridien tunkeutumistutkimuksissa kuin Suomessa. Näin Suomen ja Ruotsin koekenttien vertailu tulee jatkossa tältä osin mahdolliseksi. Kullakin koekentällä ilmasto-olosuhteet kuten lämpötila- ja kosteusolosuhteet ovat toisistaan poikkeavia ja esimerkiksi tiesuolaus on erilaista. Myös tutkimusten ja mittausten yksityiskohtiin liittyvät tekijät voivat poiketa toisistaan. Suomen kannalta on oleellista saada mahdollisimman paljon kenttätutkimustietoa, joka vastaa nimenomaan Suomen suhteellisen ankaria ilmasto-olosuhteita ja Suomen muita käytäntöjä. Vaikka kenttätutkimus vaatii

**Taulukko 1** Suomessa sijaitsevat betonin säilyvyyden koekenttien perustiedot sekä koekenttien eri projekteissa aloitettujen kenttätutkimusten betonien lukumäärät.

pitkäaikaista sitoutumista ja panostusta, on se todettu kaikkialla tärkeäksi betonirakenteiden säilyvyyden varmistamiskeinoksi, johon myös käytännön ohjeistus, laadunvarmistus ja säilyvyyksmallinnus voivat tukeutua.

Hannele Kuosa

### Miksi kenttätutkimuksia

Kenttätutkimuksessa kaikki olosuhdetekijät sekä erilaisten vaurioitumistekijöiden vuorovaikutukset tulevat otetuiksi huomioon. Kenttätutkimuksessa betonikoekappaleet altistuvat luonnonmukaisille lämpötila- ja kosteusvaihteluille, tuulelle ja auringon säteilylle sekä mahdollisille klorideille (tiesuolaus, merivesi). Tällöin betonissa tapahtuvat muutokset kuten lujuuden kasvu (hydrataatio), kuivuminen, kastuminen sekä ilman hiilidioksidin vaikutuksesta tapahtuva karbonatisoituminen ja suojojen vaikutuksesta tapahtuvat fysikaaliset ja kemialliset muutokset tulevat otetuiksi huomioon. Nämä muutokset vaikuttavat betonin ja usein erityisesti sen pintaosan ominaisuuksiin kuten sementtikiven huokosrakenteeseen, tiiviyyteen ja jäätyvän veden määrään. Muutokset ja niiden merkitys ovat myös suhteessa siihen, minkälainen betonin ja sen sideaineen koostumus on.

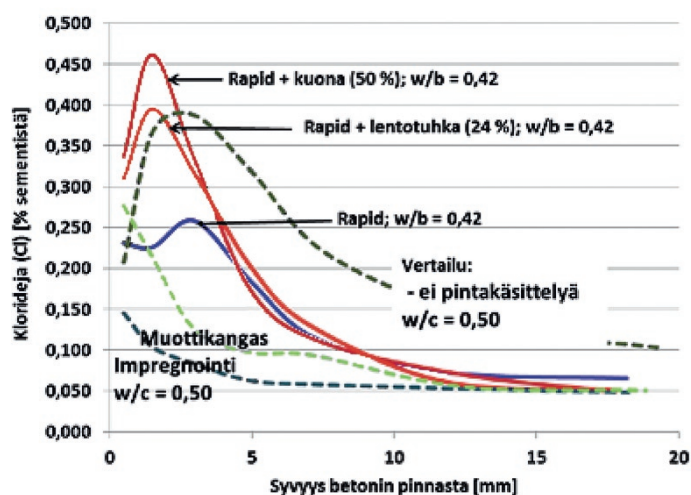
Erityisesti tulevaisuudessa tarvitaan luotettavaa tietoa siitä, minkälaisia ovat erilaisia seosaineita ja niiden yhdistelmiä sisältävien sideaineiden säilyvyysominaisuudet. Tietoa tarvitaan lisää myös siitä, mikä on betonin vesi-sideainesuhteen ja ilmahuokostuksen sekä sen laadun merkitys pitkän ajan kuluessa. Kenttätutkimuksin on saatavissa tietoa myös siitä, miten säilyvyyttä voidaan parantaa vaikeimmissa olosuhteissa esimerkiksi betonin pintaosan ominaisuuksia parantavin tai pintaa suojaavin erityiskeinoin. Valitettavasti betonin ikääntymistä ei vielä kyetä ottamaan

**1** Tienvieruskoekentän pakkas-suolarapautuman koekappaleita ( $150 \times 150 \times 75 \text{ mm}^3$ ) metallihäkeissään (4 kpl/betoni). Taaempina isompia koekappaleita ( $500 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$ ), joiden tielle suuntatuvasta pinnasta alkaen määritetään kloridien määrä eri syvyyksillä. Sekä metallihäkit että isot betonikappaleet ovat puutelineiden päällä ja näin ollen irti maasta.

**2** Esimerkkejä tienvieruskoekentän betonien kloridiprofiileista kolmannen talvikauden jälkeen. Kloridien tunkeutumiseen vaikuttaa oleellisesti betonin tiiviys eli erityisesti sen vesi-sideainesuhde ja sideainetyyppi. Pinnan laatua voidaan parantaa paitsi hyvällä jälkihoidolla myös esimerkiksi vettähylykivällä impregnoinnilla tai käyttämällä valussa muottikangasta. Pintaosassa kloridiprofiiliin muotoon vaikuttaa sitoutuneiden kloridien vapautuminen karbonatisoitumisen vaikutuksesta, siirtyminen syvemmälle betoniin ja betonista pois huuhtoutuminen. Syvemmällä betonissa kloridit siirtyvät pääosin pitoisuuserojen tasaantumisen kautta diffuusiolla.

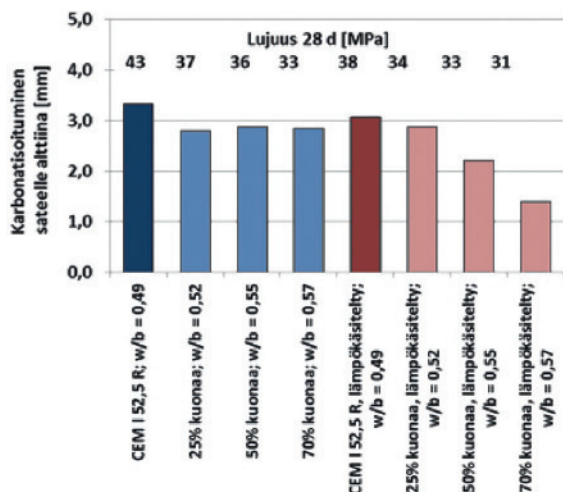


1



2





3 YmpBetoni-projektin kuonaa (0 %, 25 %, 50 % ja 70 % sideaineesta) sisältäneiden betonien karbonatisoituminen kenttäolosuhteissa 7 vuoden altistuksen jälkeen. Espoon koekenttä, koekappaleet sateelta suojaamattomina.

huomioon kiihdytetyissä laboratoriokokeissa. Tosin esimerkiksi pakkas-suolarapautumisen testausta ollaan jo kehittämässä eurooppalaisella tasolla siihen suuntaan, että testaus ottaisi paremmin huomioon todelliset olosuhteet ja myös betonin ikääntymisen vaikutukset. Myös tässä työssä Euroopan eri maiden kenttätutkimuksissa saatavat tulokset ovat välttämättömiä. Suomessa kenttätutkimukset on saatu useiden tutkimusprojektien kautta hyvälle alulle ja ne ovat koko ajan myös laajenemassa. Tulosten hyödyntäminen on jo aloitettu ja erityisesti se on mahdollista tulevaisuudessa, kun Suomen säilyvyyden koekentät ovat olleet seurannassa nykyistä pidempään.

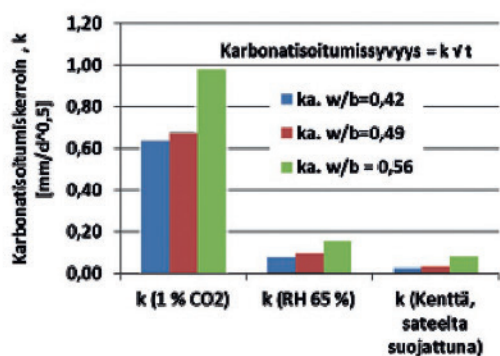
### Tutkimusprojektit ja tulosten saatavuus

Kansalliseen DuraInt-projektiin (*Effect of Interacted Deterioration Parameters on Service Life of Concrete Structures in Cold Environment, 2009–11*) sisältyi uusien kenttätutkimusten aloittaminen ja myös kokonaan uuden koekentän eli tienvieruskoekentän perustaminen. Projektiin sisältyi myös jo aiemmin käynnistettyjen kenttätutkimusten seurantamittauksia. DuraInt-projektin rahoittivat TEKES, Tiehallinto/Liikennevirasto, Ratahallintokeskus, Finnsementti Oy, Parma Oy, Rudus Oy, SBK-säätiö, Helsingin kaupunki, Tampereen kaupunki, Suomen Betoniyhdistys ry sekä TKK/Aalto-yliopisto.

Kaikki DuraInt-projektin kenttätutkimuksissa saadut tulokset on koottuna Excel-taulukoihin ja projektiraportointeihin [1, 2, 3]. Tietoja päivitetään jatkossa uusilla mittaustuloksilla ja kaikki tieto tallennetaan tietokantaan siten, että se säilyy myös tulevien sukupolvien käyttöön. DuraInt-projektin kenttäkokeiden raportointi kuten myös projektin kaikki muut raportoinnit ovat julkisia ja saatavilla (www) [1, 3]. DuraInt-projekti sisälsi myös laajan betonien ennakkotutkimuksen sekä betonien perusominaisuuksien että kloridien tunkeutumisen, karbonatisoitumisen ja pakkasvaurioitumisen sekä pakkas-suolarapautumisen osalta. Näitä tuloksia on jo verrattu ja verrataan myös jatkossa pitkäaikaisten kenttäkokeiden antamiin tuloksiin.

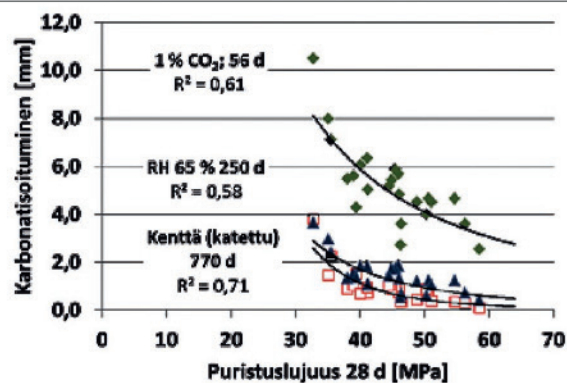
Aiempiä kenttätutkimuksia sisältäneitä projekteja olivat EU-projekti CONLIFE (*Life-time Prediction of High-Performance Concrete with Respect to Durability, 2001–04*) ja kansallinen projekti YmpBetoni (*Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit, 2002–04*) [4, 5]. Lisäksi Suomessa seurataan ja hyödynnetään kenttämittaustuloksia, joita saadaan BTB-projektissa (*Beständighet Tösaltad Betong, 1996–*) käynnistetyssä kenttätutkimuksessa Ruotsin tieolosuhdekentällä Boråsissa [6].

CONLIFE-projektin korkealujuuksisten betonien osalta on myös saatavilla kattava projektiraportointi, joka sisältää mm. sekä laboratoriokokeiden tuloksia että myös alku-

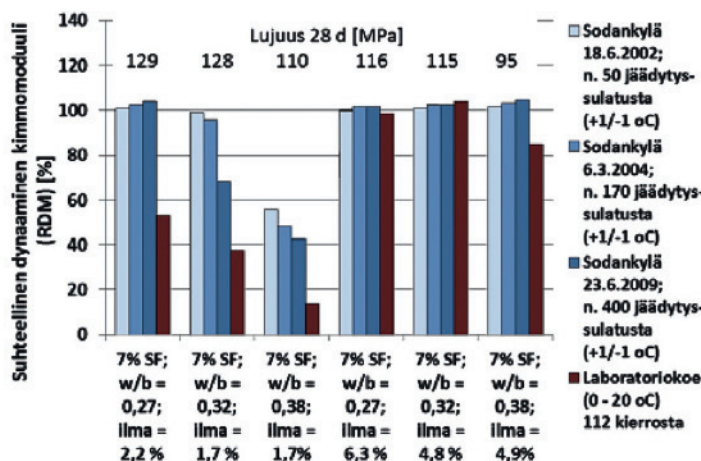


4 DuraInt-projektin karbonatisoitumistutkimusten betoneille (23 koostumusta) saatuja keskimääräisiä karbonatisoitumiskertoimia (k). Kolme keskimääräistä vesi-sideainesuhdetta ja kolme eri olosuhdetta: 1) kiihdytetty karbonatisointi (1 % CO<sub>2</sub>, RH 60 %; T = 20 °C), 2) suhteellinen kosteus RH65 % (CO<sub>2</sub> ≈ 0,042 %; lämpötila 20 °C) ja 3) sateelta suojattu ulko-olosuhde (Espoo; CO<sub>2</sub> ≈ 0,038 %; vuoden keskilämpötila noin 6 °C).

5 DuraInt-projektin betonien karbonatisoituminen 28 d puristuslujuuden funktiona. Tulokset karbonatisoitumisen osalta kolmessa eri tapauksessa (olosuhde ja aika).



6 CONLIFE-projektin 7 % sementistä (CEM I 52,5 R) silikaa (SF) sisältäneiden huokostamattomien ja huokostettujen korkealujuusbetonien pakkasvaurioituminen Sodankylän koekentällä sekä laboratoriokokeissa (112 jäädytys-sulatuskierrosta; 0–20 °C) saatu ennakkotulos.



vaiheen kenttämittaustuloksia useiden muiden Euroopan maiden koekentiltä [4]. Myös Ymp-Betoni-projektin erityisesti masuunikuonaa tai lentotuhkaa sisältävien normaalin lujuusalueen betonien tulokset on esitetty omassa julkaisussaan [5]. Myös näiden projektien osalta kenttämittaustulokset on viety omiin Excel-taulukoihinsa, joita päivitetään jatkossa uusilla tuloksilla. Kaikkien projektien raportoinnit ja muu tieto kuten Excel-taulukoiden sisältämät päivitettävät mittaustulokset voidaan haluttaessa toimittaa tutkimuskäyttöön sekä kotimaahan että ulkomaille VTT:n tai Aalto-yliopiston kautta.

### Tulosesimerkkejä

DuraInt-projektissa aloitettiin kenttätutkimukset tieolosuhteiden koekentällä syksyllä 2007. Kloridien tunkeutumisen osalta tuloksia on jo saatu mm. vesi-sideainesuhteen, sideaineen koostumuksen ja ilmamäärän vaikutuksista sekä betonipinnan suojaus- ja tiivistysmenetelmien tehokkuudesta. Kloriditutkimuksissa koekentällä on tällä hetkellä 30 erilaista betonia tai muuta tutkimustapausta. Kloridien tunkeutumisen osalta kansallista tietämystä on kyetty DuraInt-projektin aikana lisäämään huomattavasti. Kenttämittauksissa saatuja tuloksia on voitu verrata myös laboratoriossa betonien kolmen kuukauden iässä tehtyihin kiihdytetyn kokeen antamiin tuloksiin (kloridimigraatiokerroin, NT Build 492). Jatkossa on oleellista, että kloridien tunkeutumista koekentällä seurataan edelleen. Näin saadaan tietoa mm. siitä, miten sideainekoostumukseltaan erilaisissa betoneissa ajan kuluessa tapahtuva lujuudenkehitys ja mikrorakenteen tiivistyminen vaikuttavat kloridien tunkeutumiseen. (Kuvat 1 ja 2)

DuraInt-projektissa aloitettiin syksyllä 2007 myös ulkona katetussa olosuhteessa olevien betonikoostumusten karbonatisoitumisen seuranta. Lisäksi seurannassa on sekä Espoon että Sodankylän koekentillä sateelle alttiina olevia betoneja projekteista CONLIFE ja YmpBetoni. Tavoitteena on saada tietoa sideainekoostumuksen ja vesi-sideainesuhteen, lujuuden sekä suojahuokostuksen ja olosuhteiden vaikutuksesta karbonatisoitumisnopeuteen. DuraInt-projektin osalta seurannassa on tällä hetkellä 23 betonikoostumusta, joiden vesi-sideainesuhde on 0,41–0,60. Vesi-sideainesuhteella 0,42 karbonatisoituminen oli koekentällä katetussa olosuhteessa 2 vuoden jälkeen pääosin alle 0,5 mm, mutta vesi-sideainesuhteella 0,60 jo noin 4 mm. Karbonatisoitumiseen vaikutti selvästi myös sideaineen koostumus. Sementillä CEM I karbonatisoituminen on ollut hidasta. Betonin erityisen suuri ilmamäärä (yli 5–6 %) lisäsi karbonatisoitumista. Puristuslujuuden ja kenttäolosuhteen karbonatisoitumisen välinen yhteys oli melko hyvä ( $R^2 = 0,70$ ). Kenttäkokeen

tuloksia voidaan verrata myös kiihdytetyn laboratoriokokeen antamiin ennakkotuloksiin, koska kaikkien betonien karbonatisoituminen määritettiin myös 56 vuorokauden pituisessa kiihdytetyssä kokeessa, jossa hiilidioksidipitoisuus oli  $\text{CO}_2 = 1\%$  (RH 60 %;  $T = 20^\circ\text{C}$ ). Kiihdytetyssä kokeessa ja kenttäkokeessa saadun tuloksen välinen yhteys oli suhteellisen hyvä ( $R^2 = 0,70$ ). Vielä selvempi yhteys oli ei-kiihdytetyllä vakioolosuhteen laboratoriokokeella (RH 65 %;  $T = 20^\circ\text{C}$ ) ja kenttäkokeella ( $R^2 = 0,95$ ). Kaikkiaan käyttöikämallinnuksessa otetaan huomioon kaikki karbonatisoitumisessa vaikuttavat tekijät. Pitkän ajan kuluessa karbonatisoitumiseen vaikuttaa betonien ajan kuluessa tapahtuva lujittuminen ja tiivistyminen, mikä on eri sideainekoostumuksen betoneille erilaista. Erityisesti tästä tarvitaan jatkossa lisää tietoa. Käynnissä olevat pitkäaikaiset kenttätutkimukset ovat luotettava vertailukohde tulevaisuuden karbonatisoitumismallinnukselle. (Kuvat 3–5)

DuraInt-projektin betonien vasta kolme vuotta jatkuneissa kenttäkokeissa jäädytys-sulatuksen aiheuttamaa oleellista pakkasvaurioitumista tai pakkas-suolarapautumista ei ole vielä tapahtunut. Ennemmin on tapahtunut betonien lujittumista tai muutoksia, jotka ovat tässä altistuksen alkuvaiheessa aiheutuneet todennäköisesti muista syistä kuten lujuuden kasvusta, kosteus- ja suolapitoisuuden muutoksista sekä paisumisesta ja kutistumisesta. Joka tapauksessa on voitu todeta, että pienetkin koe-kappaleissa tapahtuvat muutokset ovat tarkoin mitattavissa. DuraInt-projektissa aloitettujen kenttäkokeiden avulla tullaankin jatkossa saamaan paljon tarkkaa tietoa kenttäolosuhteissa tapahtuvasta jäädytys-sulatuksen aiheuttamasta vaurioitumisesta. CONLIFE-projektin korkealujuusbetonit ovat olleet Sodankylän koekentällä jo loppuvuodesta 2001 ja osa tämän projektin huokostamattomista betoneista on myös jo vaurioitunut selvästi (Kuva 6).

### Viitteet

1. Kuosa, H. 2011. Concrete durability field testing. Field and laboratory results 2007–2010. Research Report VTT-R-00482-11, 96 s. + 23 liitettä.
2. Kuosa, H. 2011. Concrete durability field testing in Finland. NCR 2011, s. 247–250.
3. DuraInt-projektin projektiraportit (Taskit 1–6). <http://www.vtt.fi/sites/duraint/index.jsp>
4. CONLIFE-project. Reports (Tasks 1–10). <http://www.vtt.fi/sites/duraint/index.jsp>
5. Tulimaa, M., Wirtanen, L., Holt, E., Kukko, H. & Penttala, V. 2005. Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit. TKK, Rakennusmateriaalitekniikka, Julkaisu 18, 157 s.
6. Vesikari, E. 2004. BTB-projekti, Yhteenvetoraportti. VTT Sisäinen raportti RTE40-IR-16/2004, 75 s.

### Summary

there are three Finnish concrete field testing stations containing approximately 90 different concrete mixture designs that have been placed over a 10 year period (2001–12). There is no other method as reliable as field testing to get reference data for service life models. Field testing includes e.g. moisture, salt exposure, temperature and solar radiation variations and effects of carbon dioxide and hydration with time. In field testing also all interacted deterioration is included - e.g. frost deterioration is interacting with chloride penetration and carbonation.

Of the Finnish field stations, two are without salt and one highway testing field, located in Southern Finland (city of Kotka) has salt exposure. The fields without salt exposure are in southern and northern Finland (cities of Espoo and Sodankylä).

All field testing results for the mixes prepared after 2007 in the national DuraInt-project as well as all the updated field testing data for the former field testing projects in Finland, CONLIFE (2001–04) with high strength concretes and a parallel national project YmpBetoni (2002–04) with Finnish ecological binding materials, are summarized in an Excel-format database. This data will be updated for service life modelling work together with other available field testing data, such as the longer-term BTB-project data from the Swedish highways testing field located in Borås (started 1996).

Chloride profiles have so far been created after the first and mostly also after the third winter seasons. The sheltered field carbonation measurement times so far are at about 270 days and 770 days. No real frost- or frost-salt deterioration has been detected so far in the DuraInt-project concretes located at the southern Finland highway field station or at the field station without salt exposure (started 2007). In the concretes at the field station in northern Finland, frost deterioration was detected already after some winters in some high strength concretes with no air-entrainment.

Laboratory and field results have mainly shown good or acceptable correlations. However to improve future laboratory testing methods and service life models, extended field testing is also needed, for instance in the case of new binding materials, new mix designs or special concrete surface protection methods.