



Rappeutumisen vaikutukset betonisillan kantokykyyn

Tilaaja: Tiehallinto
Valtion ydinjätehuoltorahasto
Ratahallintokeskus
Helsingin kaupungin rakennusvirasto
Turun kaupunki
Espoo kaupunki
Tampereen kaupunki



| | |
|------------------------------|--|
| Tilaaaja | Tiehallinto, Siltatekniikka PL 33 00521 HELSINKI Valtion ydinjätehuoltorahasto PL 32 00023 VALTIONEUVOSTO Ratahallintokeskus PL 185 00101 HELSINKI Helsingin kaupungin rakennusvirasto PL 1515 00099 HELSINGIN KAUPUNKI Turun kaupunki Ympäristö- ja kaavoitusvirasto Suunnittelutoimisto Linnankatu 31 20100 TURKU Espoo kaupunki, Tekninen keskus Virastopiha 2 C 02770 ESPOO Tampereen kaupunki, Katuyksikkö PL 487 33101 TAMPERE |
| Tilaus | 178/2000/20/54 7/2004/SAF 246615 HKD 048021 Päätöspöytäkirja 26.02.2004, 2789-2004 (663, 065) 09.02.2004, pöytäkirjanote 739 / 241 / 2004 YPA 3799/652/04 |
| Yhteyshenkilö VTT:ssä | VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka Erikoistutkija Pertti Pitkänen Lämpömiehenkuja 2, Espoo PL 1800, 02044 VTT Puh. 020 722 6916 Faksi 020 722 7055 Sähköposti pertti.pitkanen@vtt.fi |

Tehtävä **Rappeutumisen vaikutukset betonisillan kantokykyyn**

TIIVISTELMÄ

Tutkimusraportissa on tarkasteltu betonisiltojen kantavuuteen vaikuttavia vauriomekanismeja ja kuinka vaurioiden vaikutus voidaan ottaa huomioon arvioitaessa kantavuutta. Raportti perustuu pääasiassa CONTECVET tutkimusprojektin raportteihin.

Betonisiltojen kantavuuteen vaikuttavat vauriomekanismit Suomessa ovat raudoituksen korroosio ja betonin pakkasvaurio. Pakkasvaurio voidaan jakaa sisäiseen pakkasvaurioon ja suola-pakkasrapautumiseen. Sisäinen pakkasvaurio vaurioittaa rakenteessa koko betonipoikkileikkausta. Suola-pakkasrapautuminen vaurioittaa rakenteen pintaosia aiheuttaen niissä rapautumista ja lohkeilua. Suola-pakkasrapautuminen ei yleensä aiheuta sisäisiä vaurioita betoniin.

Raudoituksen korroosion seurauksena raudoitustankojen pinta-ala pienenee. Lisäksi korroosio vaikuttaa raudoituksen mekaanisiin ominaisuuksiin, betonipeitteen halkeiluun ja raudoituksen tartuntaan. Raudoitustankojen pinta-alan pieneneminen vaikuttaa suoraan rakenteen kantavuuteen. Korroosio heikentää raudoitustankojen venymäominaisuuksia, mikä huonontaa rakenteen sitkeyttä murtotilassa. Korroosion aiheuttama halkeilu huonontaa tartuntaa ankkurointialueilla. Arvioitaessa korroosion vaikutusta rakenteen kantavuuteen, saadaan varmallalla puolella oleva arvio kantavuudesta tavanomaisilla laskentamalleilla käyttämällä niissä raudoitustankojen redusoitua poikkipinta-alaa. Lisäksi taivutuskaasiteettia arvioitaessa puristuspuolen korroosiotilassa olevan raudoituksen betonipeitettä ei huomioida. Leikkauskapasiteettia arvioitaessa jätetään huomioonottamatta korroosiotilassa olevien hakojen betonipeite. Puristetuissa rakenneosissa puristuspuolen korroosiotilassa olevan raudoituksen betonipeitettä ei huomioida.

Sisäinen pakkasvaurio huonontaa poikkileikkauksen betonin ominaisuuksia. Betonin ominaisuuksien huononeminen heikentää raudoituksen tartuntaa betoniin. Rakenteen kantavuutta arvioitaessa on betonin muuttuneet ominaisuudet otettava huomioon laskelmissa. On suositeltavaa, että betonin ominaisuudet määritetään tutkittavasta rakenteesta otetuista näytteistä. On myös mahdollista käyttää ominaisuuksille alaraja-arvoja, jotka on saatu voimakkaasti pakkasvaurioituneelle betonille. Koska alaraja-arvot ovat erittäin pieniä, saadaan niitä käyttämällä yleensä aina liian epäedullinen käsitys rakenteen todellisesta kantavuudesta.

Suola-pakkasrapautuminen vaurioittaa ulkopintaa ja pinnan rapautumisen seurauksena betonipoikkileikkaus pienenee. Saavuttaessaan raudoituksen tasan suola-pakkasrapautuminen vaikuttaa raudoituksen korroosion käynnistymiseen ja etenemisnopeuteen. Suola-pakkasrapautumisen vaikutuksen arviointi kantavuuteen edellyttää, että rapautumisen syvyys ja jäännöspoikkileikkauksen pinta-ala tunnetaan rakenteen toiminnan kannalta eniten rasitetuissa poikkileikkauksissa ja otetaan huomioon laskelmissa. Rapautumisen määrä ja jäännöspoikkileikkauksen mitat on selvitettävä mittaamalla rakenteesta.

ABSTRACT

This research report considers deterioration mechanisms affecting the load-carrying capacity of concrete bridges and how the deterioration effects can be taken into account when estimating the load-carrying capacity. The report is based mainly on results presented in different reports of the CONTECVET research project.

The deterioration mechanisms affecting the load-carrying capacity of concrete bridges in Finland are corrosion of reinforcement and frost damage. The types of frost damage are internal frost damage and salt-frost scaling. Internal frost damages the whole concrete cross-section. Salt-frost scaling causes scaling and splitting of the surface parts of the structure. Salt-frost scaling usually does not cause internal damage to the concrete.

Corrosion of reinforcement causes a decrease in the cross-sectional area of reinforcing bars. In addition it affects the mechanical properties of steel, cracking of concrete cover and bond properties of reinforcing bars. The decrease in cross-sectional area of reinforcing bars directly affects the load-carrying capacity of the structure. Corrosion reduces the elongation properties of reinforcing bars, which reduces the toughness of the structure in the ultimate limit state. Cracking caused by corrosion reduces the bond at anchorage areas. When assessing the effect of corrosion on the load-carrying capacity of the structure, a conservative estimate can be made by using the reduced bar section in conventional calculation models. In addition, when estimating the ultimate bending moment, the contribution of the concrete cover at the compression chord is not taken into account. When estimating the ultimate shear force, the contribution of the concrete cover at both the compression chord and the sides is not taken into account. In columns, the contribution of the concrete cover at the compression chord is not taken into account.

Internal frost damage reduces the concrete properties in the cross-section of the structure. The reduction of concrete properties also reduces the bond strength of reinforcement. The reduced concrete properties must be taken into account in structural calculations when assessing the load-carrying capacity of the structure. It is recommended that the concrete properties are determined using samples taken from the structure. It is also possible to use material properties of severely frost damaged concrete as lower boundary data. Because the lower boundary data can be very low, they tend to give an unfavourable estimation of the load carrying capacity of the structure.

Salt-frost scaling damages the outer surface and reduces the cross-section. The assessment of the effect of salt-frost scaling to the load-carrying capacity requires that the reduced cover and reduced cross-section area are known in the most critical cross-sections when considering the structural behaviour. The depth of scaling and the dimensions of the reduced cross-section must measure from the structure.

SAMMANDRAG

I forskningsrapporten behandlas skademekanismerna som påverkar betongbroarnas bärförmåga och hur skademekanismernas effekt kan beaktas när man uppskattar konstruktionens bärförmåga. Rapporten baserar sig huvudsakligen på resultat, som är presenterade i CONTECVET forskningsprojekts olika rapporter.

Skademekanismerna som påverkar betongbroarnas bärförmåga i Finland är armeringskorrosion och betongens frostsador. Frostsadorna kan delas på inre frostsador och saltfrostsador. Inre frostsador skadar hela betongtvärsnittets area. Saltfrostsador skadar tvärsnittets ytor och förorsakar vittring och avflagnig. Saltfrostsador förorsakar vanligen inte inre skador i betongen.

Armeringskorrosionen reducerar armeringstångens tvärsnittareal. Ytterligare påverkar korrosionen armeringens mekaniska egenskaper, betongtäcksiktets sprickbildning och armeringens vidhäftning. Minskningen av armeringstångarnas tvärsnittareal påverkar direkt konstruktionens bärförmåga. Korrosion reducerar armeringstångarnas töjningsegenskaper, vilket försämrar konstruktionens duktilitet i gränstillstånd. Sprickbildningen i förankringsområden orsakad av korrosion försämrar vidhäftningen. När man uppskattar armeringskorrosionens effekt på konstruktionens bärförmåga, kan man få en säker uppskattning av bärförmågan genom att använda armeringstångarnas reducerade tvärsnittarealer i vanliga beräkningsmodeller. Vidare när man beräknar böjningskapacitet, beaktas inte den korroderande armeringens betongtäcksikt. När man beräknar tvärkapacitet, beaktas inte betongtäcksiktet utanför de korroderande byglarna. I konstruktions delar under tryck beaktas inte trycksidans korroderande armeringars betongtäcksikt.

Inre frostsador reducerar betongens egenskaper i det skadade tvärsnittet i betongkonstruktionen. Reduceringen av betongens egenskaper försämrar också armeringens vidhäftning i betongen. När man uppskattar konstruktionens bärförmåga, bör man beakta betongens reducerade egenskaper i beräkningarna. Rekommendationen är, att de reducerade egenskaperna bestäms genom prov tagna av konstruktionen. Det är också möjligt att för materialegenskaperna använda de lägre gränsvärdena, som är man har fått för mycket starkt frostsadad betong. Eftersom de lägre gränsvärdena är mycket låga, får man för ogynnsam uppfattning av konstruktionens bärförmåga genom att använda dessa.

Saltfrostsadan skadar den ytter ytan och med anledning av ytans vittring minskar betongens tvärsnittareal. När saltfrostsadan uppnår armeringen, påverkar den korrosionens början och propagering. Uppskattning av saltfrostsadans effekt på konstruktionens bärförmåga förutsätter, att vittringens djup och resttvärsnittarealen är kända i de mest belastade tvärsnittarealerna och beaktas i beräkningarna. Vittringens djup och resttvärsnittets dimensioner bör mätas ur konstruktionen.

ALKUSANAT

Rappeutumisen vaikutukset betonisillan kantokykyyn on yksi vuosien 2003 - 2004 aikana VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa toteutetuista Betoniteknillisiin siltatutkimuksiin kuuluvista tutkimuksista. Betoniteknilliset siltatutkimukset on Tiehallinnon, Ratahallintokeskuksen, Helsingin kaupungin rakennusviraston, Säteilyturvakeskuksen, Espoon kaupungin teknisen keskuksen, Tampereen kaupungin katuyksikön ja Turun kaupungin kunnallisteknisen osaston rahoittamaa jatkuvaa projektitoimintaa, joka koostuu useista osatutkimuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ | 2 |
| ABSTRACT..... | 3 |
| SAMMANDRAG | 4 |
| ALKUSANAT | 5 |
| 1 JOHDANTO | 7 |
| 2 RAUDOITUKSEN KORROOSIO | 7 |
| 2.1 Korroosion vaikutukset | 7 |
| 2.1.1 Raudoitustangon poikkileikkausalan pieneneminen | 7 |
| 2.1.2 Korroosion vaikutus raudoituksen mekaanisiin ominaisuuksiin | 9 |
| 2.1.3 Betonipeitteen halkeilu | 9 |
| 2.1.4 Tartunta..... | 10 |
| 2.2 Korroosion vaikutuksen arviointi kantavuuteen..... | 12 |
| 2.2.1 Taivutuskapasiteetti | 12 |
| 2.2.2 Leikkauskapasiteetti | 13 |
| 2.2.3 Puristetun ja taivutetun rakenteen rakenteen kapasiteetti (pilari)..... | 14 |
| 2.3 Laskentamalleja korroosion vaikutuksen arvioimiseksi..... | 15 |
| 2.3.1 Raudoitustangon pinta-ala | 15 |
| 2.3.2 Halkeilu | 16 |
| 2.3.3 Tartunta..... | 16 |
| 3 PAKKASVAURIO | 17 |
| 3.1 Pakkasvaurion tyypit | 17 |
| 3.2 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus betonin ominaisuuksiin..... | 18 |
| 3.2.1 Yleistä | 18 |
| 3.2.2 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus puristuslujuuteen..... | 18 |
| 3.2.3 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus halkaisuvetolujuuteen | 19 |
| 3.2.4 Halkaisuvetolujuuden pienenemisen suhde puristuslujuuden pienenemiseen | 21 |
| 3.2.5 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus kimmomoduuliin | 21 |
| 3.2.6 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus tartuntaan | 23 |
| 3.3 Pakkasvaurion vaikutuksen arviointi kantavuuteen | 25 |
| 3.3.1 Kantavuuden arvioinnin perusteet | 25 |
| 3.3.2 Sisäisen pakkasvaurion vaikutuksen arviointi | 25 |
| 3.3.3 Suola-pakkasrapautumisen vaikutuksen arviointi | 27 |
| 4 YHTEENVETO | 28 |
| LÄHTEET..... | 29 |

1 JOHDANTO

Betonisiltojen kantavuuteen meillä vaikuttavat rappeutumisilmiöt ovat raudoituksen korroosio ja betonin pakkasvaurio. Pakkasvaurio voidaan jakaa sisäiseen pakkasvaurioon ja suola-pakkasrapautumisen aiheuttamaan pintaosien rapautumiseen ja lohkeiluun.

Sisäinen pakkasvaurio vaikuttaa betonirakenteessa vaurioituneen poikkileikkauksen betonin ominaisuuksiin heikentäen niitä. Raudoituksen ominaisuuksiin sisäinen pakkasvaurio ei vaikuta. Betonin ominaisuuksien heikkeneminen huonontaa kuitenkin raudoituksen tartuntaa betoniin.

Suola-pakkasrapautuminen vaikuttaa betonirakenteen ulkopintoihin. Suola-pakkasrapautuminen vaurioittaa ulkopintaa ja pinnan rapautumisen seurauksena betonipoikkileikkaus pienenee. Suola-pakkasrapautuminen ei yleensä aiheuta betoniin sisäisiä vaurioita. Saavuttaessaan raudoituksen tason suola-pakkasrapautuminen vaikuttaa luonnollisesti raudoituksen korroosion käynnistymiseen ja edelleen korroosion etenemisnopeuteen.

Seuraavassa tarkastellaan mainittuja rappeutumisilmiöitä sekä niiden vaikutusta raudoitukseen ja betonin ominaisuuksiin ja niiden yhteistoimintaan. Lyhyesti tarkastellaan myös laskentaperusteita, joita voidaan käyttää arvioitaessa mainittujen rappeutumisilmiöiden vaikutusta rakenteen kantavuuteen. Raportti perustuu pääasiassa CONTECVET tutkimusprojektin raportteihin /1,2,3/.

2 RAUDOITUKSEN KORROOSIO

2.1 Korroosion vaikutukset

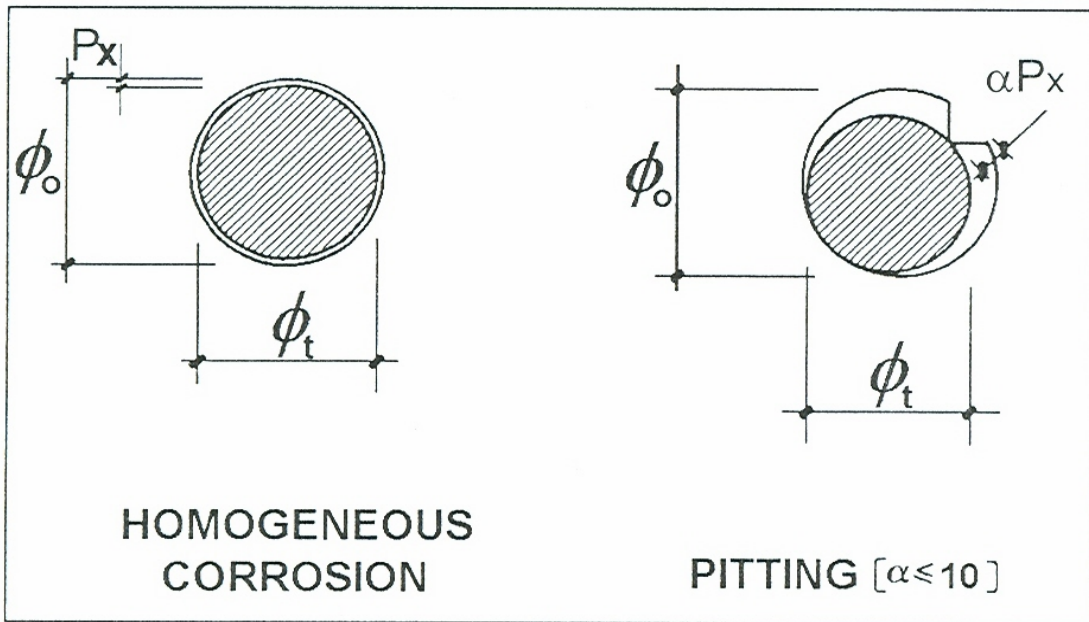
2.1.1 Raudoitustangon poikkileikkausalan pieneneminen

Korroosion aiheuttavasta tekijästä riippuen korroosion eteneminen ja vaikutus raudoitustangon pinta-alaan on erilainen. Karbonatisoituneessa betonissa korroosio raudoitustangossa etenee lähes tasaisesti. Kloridien aiheuttama korroosio on yleensä paikallista (pistemäistä) ja se aiheuttaa yleensä huomattavan poikkileikkauksen paikallisen pienenemisen. Jos korroosion syvyys tunnetaan, voidaan tangon jäännös-poikkileikkauksen halkaisija arvioida seuraavasta lausekkeesta (kuva 1)

$$\varnothing_t = \varnothing_0 - \alpha \cdot P_x \quad (1)$$

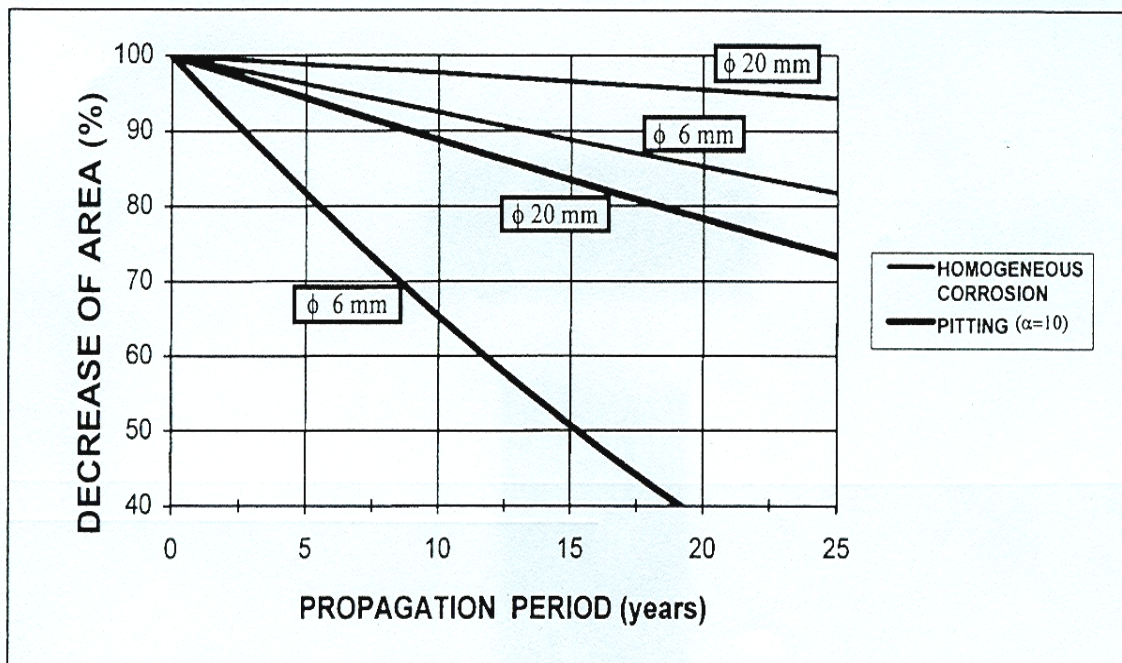
missä \varnothing_t on raudoitustangon halkaisija
 \varnothing_0 raudoitustangon alkuperäinen halkaisija
 P_x keskimääräinen tangon säteen pieneneminen
 α korroosion aiheuttavasta tekijästä johtuva kerroin.

Korroosion edetessä tasaisesti, kerroin α on 2. Jos korroosio on paikallista, α :n arvo vaihtelee huomattavasti. Suurimmillaan se voi olla jopa 10.



Kuva 1. Tasaisen ja pistemäisen korroosion vaikutus raudoitustangon poikkileikkaukseen /1/.

Kuvassa 2 on esimerkki tasaisen ja pistemäisen korroosion vaikutuksesta raudoitustangon pinta-alan pienenemiseen tangon halkaisijan ollessa pieni (6 mm) ja suurehko (20 mm) sekä korroosionopeuden ollessa $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Tasaisen korroosion vaikutus poikkileikkaukseen on pieni. Pistemäisen korroosion vaikutus voi olla tangon pinta-alaan huomattavan suuri, jos tangon halkaisija on pieni.



Kuva 2. Korroosion vaikutus raudoitustangon pinta-alan pienenemiseen tangon halkaisijan ollessa pieni (6 mm) ja suurehko (20 mm). Korroosionopeus on $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ /1/.

2.1.2 Korroosion vaikutus raudoituksen mekaaniisiin ominaisuuksiin

Korroosiolla on merkittävä vaikutus raudoituksen venymäominaisuuksiin. Raudoitustangon poikkileikkauksen pienenemän ollessa 15 ja 28 %, vastaavat kokonaistasavennyvät vetokokeessa pienenivät 30 ja 50 %.

Betonirakenteen toimintaan venymäominaisuuksien pieneneminen vaikuttaa siten, että taivutusmomenttien uudelleen jakautuminen pienenee lähestyittäessä murtotilaa. Rakenteen sitkeys pienenee.

Korroosiolla on todettu olevan pienehkö vaikutus myötöjännitykseen ja vetolujuuteen. Korroosioon on todettu pienentävän vähän myötöjännitystä ja vetolujuutta. Koetuloksiin on kuitenkin suhtauduttava tietyllä varauksella seuraavista syistä johtuen /1/:

- Murtokohdan todellisen poikkileikkausalan määrittäminen on vaikeaa.
- Jotkut tutkijat ovat käyttäneet alkuperäistä poikkileikkausala pienentyneen poikkileikkausalan sijasta määrittäessään myötöjännitystä ja vetolujuutta. Tällöin teräksen lujuuden alenemista ei ole erotettu poikkileikkauksen pienenemisen vaikutuksesta. Suurin osa lujuuden alenemisestä voi johtua poikkileikkauksen pienenemisestä.

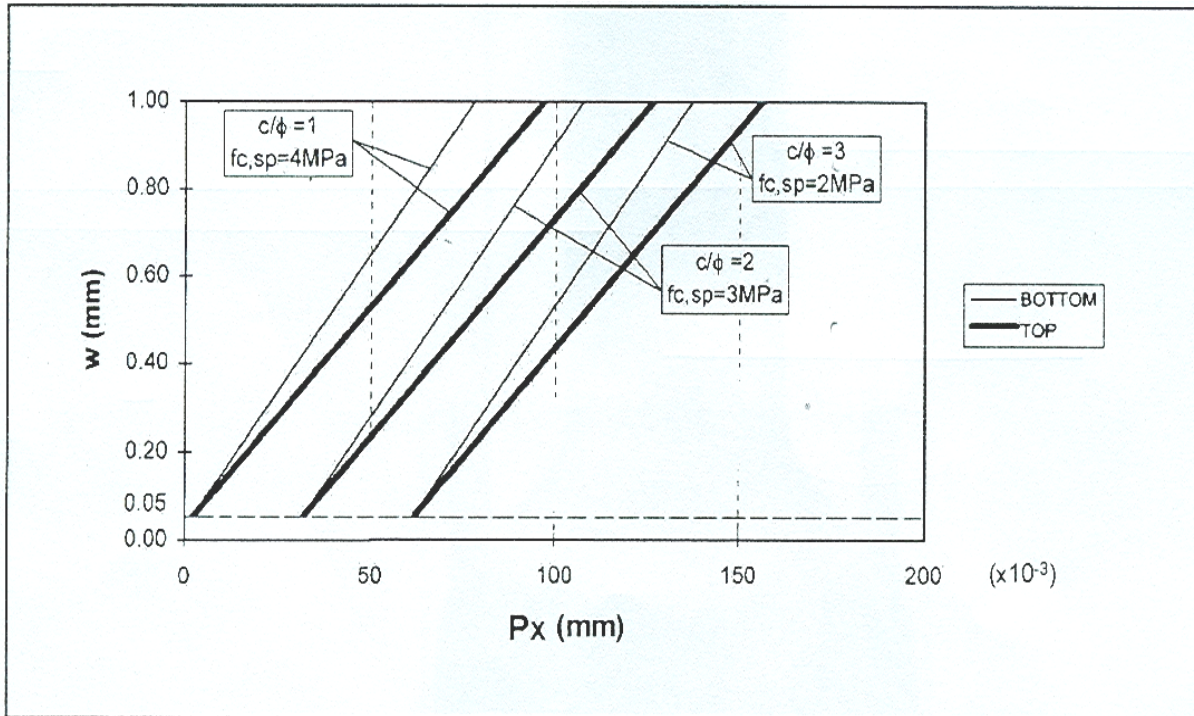
2.1.3 Betonipeitteen halkeilu

Aktiivisessa korroosiovaiheessa muodostuvat oksidit aiheuttavat ympäröivään betoniin paineen (halkaisuvoiman), joka yleensä johtaa korroosion edetessä betonipeitteen halkeamiseen. Halkeamien seurauksena betonin ja raudoituksen yhteistoiminta heikkenee, mikä pienentää betonin vaikutusta kantavuuteen. Halkeamat vaikuttavat lisäksi betonirakenteen ulkonäköön haitallisesti.

Aika halkeaman muodostumiseen riippuu pääasiassa betonipeitteen paksuuden suhteesta raudoitustangon halkaisijaan (c/ϕ) ja betonin laadusta, pääasiassa huokoisuudesta.

Halkeaman leveyden kasvamiseen vaikuttavat pääasiassa raudoitustangon sijainti rakenteessa (valu-suuntaan nähden ylä- vai alapinnassa) ja korroosionopeudesta I_{corr} . Tavanomaisilla korroosionopeuksilla 0,1-0,2 ja 1-2 $\mu A/cm^2$ korroosionopeuden vaikutus on vähäinen.

Kuvassa 3 on esitetty eräessä korroosiokekeessä halkeaman muodostuminen ja halkeamaleveyden kasvun riippuvuus raudoitustangon poikkileikkauksen pienenemisestä kolmella eri betonipeite/tangon läpimitta (c/ϕ) suhteella ja kolmella betonilaadulla. Betonin laadun ilmoittavana parametrinä on käytetty halkaisulujuutta.



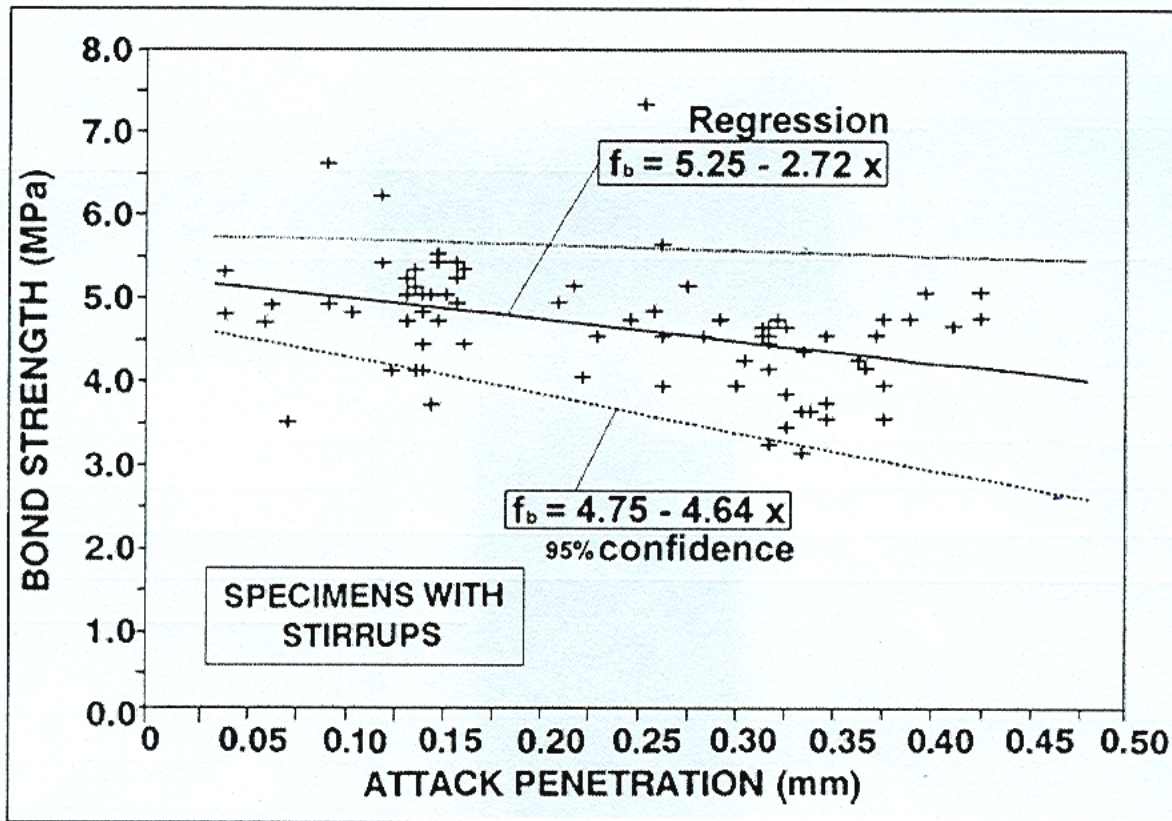
Kuva 3. Halkeamaleveyden kasvun riippuvuus raudoitustangon säteen pienemisestä /1/.

Korkealaatuisen betonin (suuri lujuus) ollessa kysymyksessä ja suhteen c/ϕ ollessa pieni, muodostuu korroosion edessä halkeama betonipeitteeseen nopeasti. Betonin laadun ollessa huonompi ja suhteen c/ϕ ollessa suuri, tarvitaan suurempi poikkileikkauksen pienenemä aiheuttamaan halkeama, koska korroosiotuotteet voivat helpommin tunkeutua heikompilaatuisen huokoisen betonipeitteen läpi.

2.1.4 Tartunta

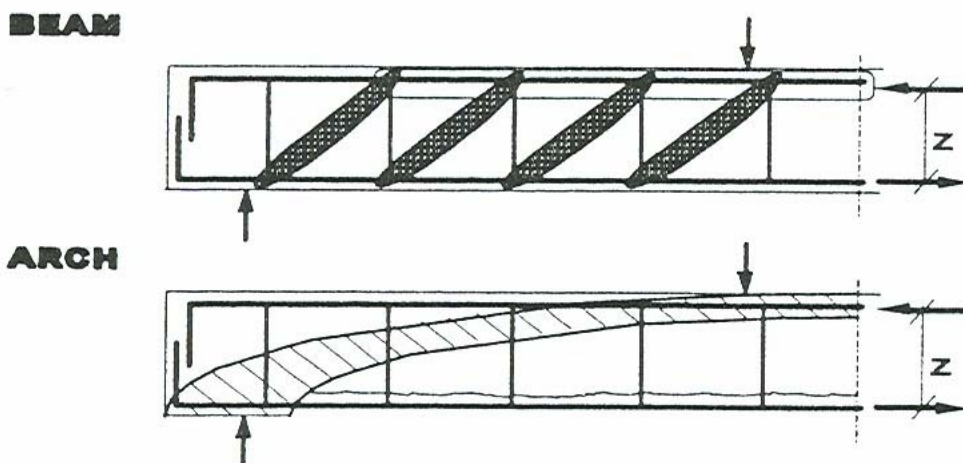
Betonin ja raudoituksen välinen tartunta on tärkeä rakenteen toiminnan kannalta erityisesti raudoitustankojen ankkurointialueilla, mutta myös muualla. Korroosion aiheuttaman betonin halkeilun seurauksena tartunta huononee. Tartunnan häviäminen ankkurointialueilla voi aiheuttaa ankkurointimurtuman. Muualla yhteistoiminnan häviäminen voi aiheuttaa taipumien ja halkeamaleveyksien kasvua.

Kuvassa 4 on esitetty tartuntakokeessa saatuja koetuloksia korroosion vaikutuksesta tartuntalujuuteen. Kokeessa ainoastaan pääteräkset olivat korrodoituneet ja haat olivat käytännössä korrodoitumattomia.



Kuva 4. Raudoitustangon korroosion (säteen pienenemisen) vaikutus tartuntalujuuteen /1/.

Keskeinen kysymys tarkasteltaessa korrodoitunutta palkkia on, vaikuttaako raudoituksen ja betonin välisen yhteistoiminnan häviäminen merkittävästi rakenteen toimintaan, jos raudoitustankojen tartunta ankkurointialueella on kunnossa. Periaatteessa tilanne on tällöin sama kuin tartunnattomilla tangoilla raudoitettussa rakenteessa (kuva 5).



Kuva 5. Ylemmässä kuvassa betonin ja raudoituksen välinen yhteistoiminta on täydellinen (toiminta palkkina, ei korroosiota). Alemmassa kuvassa tartunta puuttuu korroosion seurauksena lukuunottamatta ankkurointialuetta (toiminta kaarena) /1/.

Tartunnattomilla tangoilla raudoitettujen palkkien käyttäytymisen perusteella on odotettavissa, että tartunnan puuttuminen kasvattaa betonin puristusjännityksiä, pienentää rakenteen jäykkyyttä ja alentaa kapasiteettia.

Korrodoituneille palkeille suoritetuissa kuormituskokeissa on havaittu, että betonin ja raudoituksen välisen yhteistoiminnan hävitessä lukuun ottamatta ankkurointialueita, ei tällä ole ollut merkittävää vaikutusta palkin käyttäytymiseen. Vetoraudoitusmäärän ollessa iso, murtui useimmissa palkeissa puristuspuolen betoni puristuman ollessa huomattavasti alle 3,5 %. Kantavuuden ja muodonmuutoskyvyn aleneminen voitiin selittää raudoituksen poikkileikkausalan pienenemisellä ja betonipeitteen halkeilulla.

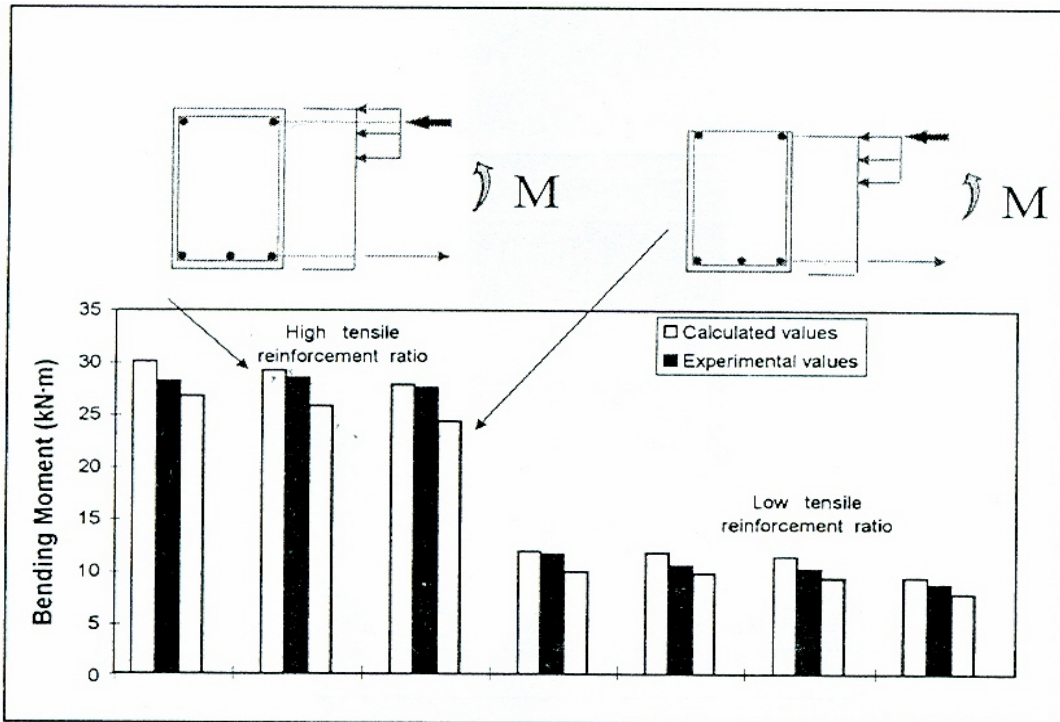
2.2 Korroosion vaikutuksen arviointi kantavuuteen

2.2.1 Taivutuskapasiteetti

Korrodoituneiden palkkien jäännöskapasiteettia ja käyttäytymistä arvioidaan seuraavassa tehtyjen kuormituskokeiden perusteella /1/. Koepalkeissa raudoituksen korroosiosyvyys oli jopa 600 µm ja joissakin tapauksissa tangoissa oli voimakasta pistekorroosiota. Tulosten perusteella voitiin tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Palkit, joissa vetoraudoituksen määrä oli suhteellisen pieni (0,5 %), murtuivat vetoterästen murtuessa (vetomurto). Murtumahetkeä edelsi huomattava halkeilu alapinnassa. Palkkien käyttäytyminen oli useimmissa tapauksissa sitkeää.
- Palkit, joissa vetoraudoituksen määrä oli suhteellisen suuri (1,5 %), murtuivat betonin murtuessa puristuspuolella (puristusmurto) ja puristusraudoituksen nurjahtaessa samanaikaisesti. Murtumaa edelsi korrodoitunutta raudoitusta ympäröivän betonin vauriot. Palkkien sitkeys pieneni huomattavasti.

Kuvassa 6 on esitetty kokeessa saavutetut taivutuskapasiteetin maksimiarvot. Kuvassa on myös Eurocode 2:n mukaan lasketut taivutuskapasiteetit. Laskelmissa on huomioitu raudoituksen jäännöspinta-ala sekä betonin osalta joko puristuspuoli kokonaan tai puristuspuoli ilman betonipeitettä.



Kuva 6. Korrodoituneiden palkkien taivutuskapasiteetit. Keskellä oleva tumma pylväs on kokeellisesti saatu tulos, muut tulokset ovat laskennallisia. Kuvassa olevat nuolet viittaavat käytettyyn laskentamalliin /1/.

Yhteenvedona voidaan todeta, että varmallalla puolella oleva laskennallinen arvio taivutuskapasiteetista saadaan tavanomaisilla laskentamalleilla käyttämällä niissä raudoitustankojen redusoitua poikkipinta-alaa ja redusoitua betonipoikkileikkausta (jos betonissa on puristuspuolella vaurioita) siten, että puristuspuolen raudoituksen betonipeitettä ei huomioida.

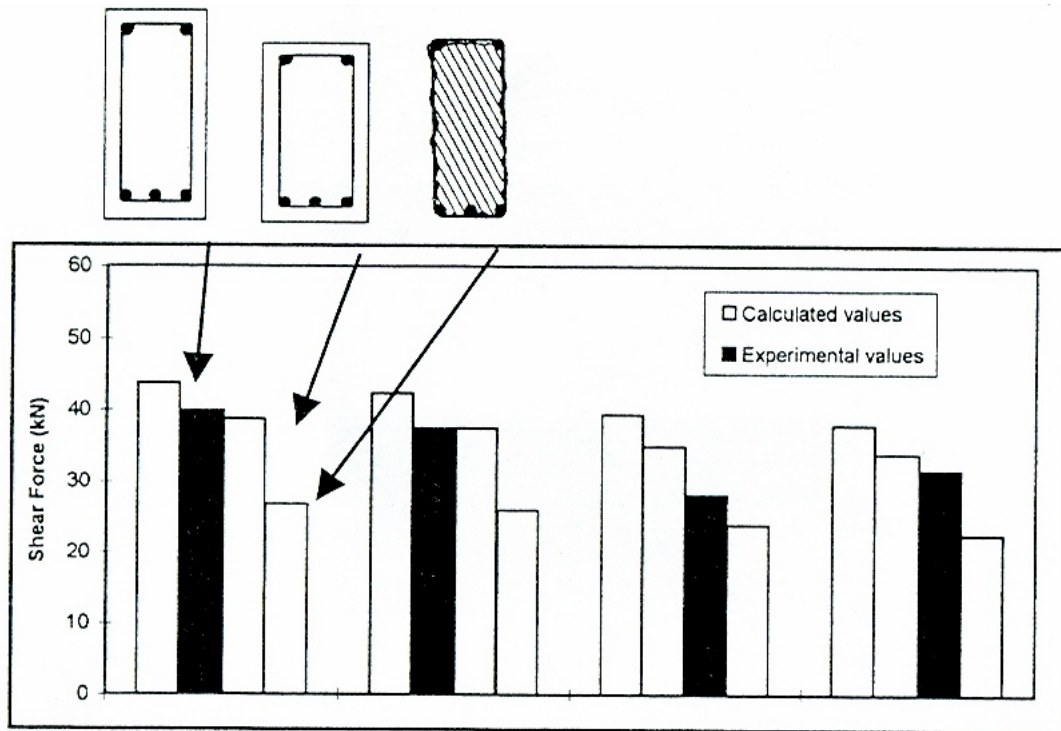
2.2.2 Leikkauskapasiteetti

Betonirakenteet suunnitellaan yleensä aina siten että murtumistapa on taivutusmurto. Raudoituksen korroosion seurauksena murtumisen voivat aiheuttaa myös leikkausrasitukset. Leikkausrasituksen aiheuttamaan murtumiseen vaikuttavat mm. /1/:

- hakaraudoituksen pistekorrosio
- puristusraudoituksen ja hakojen korroosion seurauksena tapahtunut puristuspuolen betonipeitteen lohkeaminen ja
- hakojen korroosion johdosta tapahtunut sivulla olevan betonipeitteen lohkeaminen.

Kuvassa 7 on esitetty kokeellisesti saadut leikkauskapasiteetin maksimi-arvot koepalkeilla, joissa rauditus oli korrodoitunut /1/. Koepalkeissa vetoraudituksen määrä oli huomattava (1,5 %), haat olivat $\varnothing 6$ mm 170 mm jaolla. Kuvassa on myös Eurocode 2:n mukaan lasketut leikkauskapasiteetit kolmella eri oletuksella. Raudituksen osalta laskelmissa on huomioitu aina raudituksen jäännöspinta-ala. Betonipoikkileikkauksen osalta laskelmissa on ollut seuraavat vaihtoehdot:

- täysin ehjä betonipoikkileikkaus
- puristuspuolen terästen betonipeitettä ei ole huomioitu ja
- puristuspuolen ja palkin sivujen betonipeitettä ei ole huomioitu.



Kuva 7. Korrodoituneiden palkkien leikkauskapasiteetit. Keskellä oleva tumma pylväs on kokeellisesti saatu tulos, muut tulokset ovat laskennallisia. Kuvassa olevat nuolet viittaavat käytettyyn laskentamalliin /1/.

Yhteenvedona voidaan todeta, että varmallalla puolella oleva arvio leikkauskapasiteetista saadaan tavanomaisilla laskentamalleilla käyttämällä niissä raudoitustankojen redusoitua poikkipinta-alaa sekä jättämällä huomioonottamatta hakojen betonipeite kokonaan.

2.2.3 Puristetun ja taivutetun rakenteen kapasiteetti (pilari)

Korrodoituneiden pilarien kuormituskokeissa on havaittu, että yleensä murtotilaa edeltää betonin halkeilu ja betonipeitteen lohkeilu sekä yhden tai useamman voimakkaasti korrodoituneen haan katkeaminen, mikä puolestaan johtaa pääterästen nurjahtamiseen.

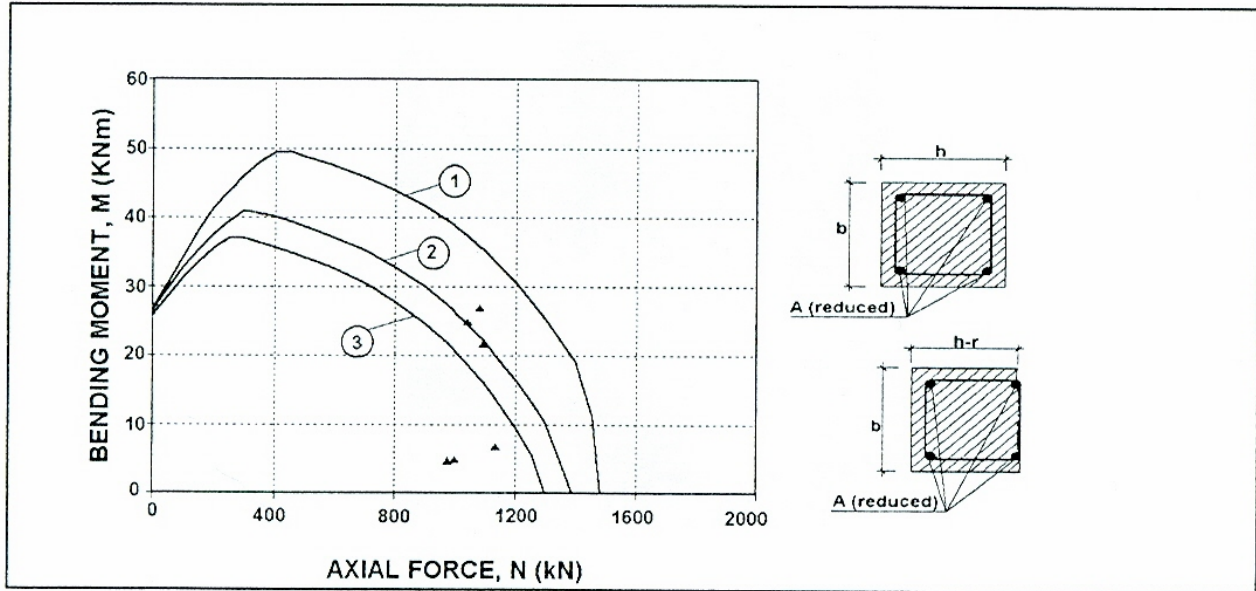
Pilareita tarkasteltaessa on huomioitava, että kuormituksesta ja geometrisista poikkeamista johtuva epäkeskisyys aiheuttaa aina pilariin myös taivutusrasituksen.

Korrodoituneen pilarin käyttäytymisessä sitä kuormitettaessa käyvät ilmi yleensä seuraavat vaiheet:

- Betonipoikkileikkaus vaurioituu ensin (betonipeite lohkeaa).
- Kuormituksen epäkeskisyys kasvaa johtuen poikkileikkauksen betonipeitteen epäsymmetrisestä vaurioitumisesta.
- Puristusraudoituksen kantavuus alenee johtuen hakojen katkeamisesta ja raudoitustankojen ennen-aikaisesta nurjahtamista.

Kuvassa 8 on esitetty korrodoituneilla pilareilla kuormituskokeissa saatuja koetuloksia ja eri laskentaotaksumilla laskettuja yhteisvaikutuskäyriä (N_u , M_u) /1/. Yhteisvaikutuskäyriä laskettaessa kaikissa

tapauksissa toisen reunan betonipeitettä ei ole huomioitu. Yhteisvaikutuskäyrässä 1 ei ole huomioitu puristusraudoituksen nurjahtamista. Käyrässä 2 on huomioitu kahden haan katkeaminen ja käyrässä 3 kolmen haan katkeaminen ja näistä aiheutuvat puristusterästen jännitysten aleneminen.



Kuva 8. Korrodoituneiden pilarien koekuormitusten koetuloksia ja eri oletuksilla laskettuja yhteisvaikutuskäyriä (N_u , M_u). Yhteisvaikutuskäyriä laskettaessa kaikissa kolmessa tapauksessa toisen reunan betonipeitettä ei ole huomioitu. Yhteisvaikutuskäyrässä 1 ei ole huomioitu puristusraudoituksen nurjahtamista. Käyrässä 2 on huomioitu kahden haan katkeaminen ja käyrässä 3 kolmen haan katkeaminen ja näistä aiheutuvat puristusterästen jännitysten aleneminen [1].

Kuvassa 8 kaikilla laskentaotaksumilla saadut tulokset aliarvioivat muutamaa koetulosta. Koesarjassa jossa pilaria kuormitettiin kaksiakselisella epäkeskisyydellä, laskentatulokset olivat kaikkiin koetuloksiin nähden varmallalla puolella, kun laskelmissa hakojen ulkopuolella olevaa betonipeitettä ei huomioida.

2.3 Laskentamalleja korroosion vaikutuksen arvioimiseksi

2.3.1 Raudoitustangon pinta-ala

Raudoitustangon korroosion syvyys (tangon säteen pieneneminen) voidaan arvioida karkeasti seuraavasta lausekkeesta

$$P_x = 0,0115 \cdot I_{\text{corr}} \cdot t \quad (2)$$

missä P_x on tangon säteen keskimääräinen pieneneminen, mm

I_{corr} korroosion nopeus, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

t aika korroosion käynnistymisestä, vuosia.

Poikkileikkauksen jäännöshalkaisija voidaan karkeasti arvioida lausekkeesta

$$\varnothing_t = \varnothing_0 - \alpha \cdot P_x \quad (3)$$

| | |
|-----------------------|---|
| missä \varnothing_t | on tangon jäännöshalkaisija ajan t kuluttua, mm |
| \varnothing_0 | tangon nimellishalkaisija, mm |
| α | kerroin, jonka suuruus on 2 korroosion ollessa tasaista (karbonatisoituneessa betonissa) ja jopa 10 korroosion ollessa pistemäistä (kloridien aiheuttama korroosio) |
| P_x | keskimääräinen korroosion syvyys (tangon säteen pieneneminen), mm. |

Tangon jäännöshalkaisija voidaan luonnollisesti määrittää mittaamalla joistakin rakenteen kohdista. Mitattu halkaisija on laskettua luotettavampi ja voi erota lasketusta. Korroosion edetessä epäsymmetrisesti betonipeitteen puolella, luotettavin arvo jäännöshalkaisijalle saadaan mittaamalla.

Tasaisen ja pistemäisen korroosion vaikuttaessa samanaikaisesti, ei tasaisen korroosion vaikutusta huomioida, sillä sen vaikutus on pieni verrattuna pistemäiseen korroosioon.

2.3.2 Halkeilu

Korrodoituneen rakenteen karakteristiselle halkeamaleveydelle on koetulosten perusteella kehitetty seuraava lauseke

$$w = 0.05 + \beta (P_x - P_{X0}), (w \leq 1,0 \text{ mm}) \quad (4)$$

| | |
|-----------|--|
| missä w | on arvioitu halkeamaleveys, mm |
| P_x | keskimääräinen korroosion syvyys (tangon säteen pieneneminen), mm |
| P_{X0} | keskimääräinen korroosion syvyys halkeaman muodostuessa, mm |
| β | raudoitustangon asemasta riippuva kerroin ($\beta = 10$ tangon sijaitessa yläpinnassa ja 12,5 tangon sijaitessa alapinnassa). |

Tangon keskimääräinen korroosion syvyys P_{X0} (säteen pieneneminen) halkeaman muodostuessa voidaan arvioida lausekkeesta

$$P_{X0} = (83,8 + 7,4 \cdot c/\phi - 22,6 \cdot f_{c,sp}) \cdot 10^{-3} (P_{X0} \geq 0) \quad (5)$$

| | |
|----------------|--|
| missä c/ϕ | on betonipeitteen suhde tangon halkaisijaan |
| $f_{c,sp}$ | betonin halkaisuvetolujuus (MPa). Halkaisuvetolujuus voidaan määrittää kokeellisesti tai seuraavasta Eurocode 2:ssa esitetystä lausekkeesta $f_{c,sp} = f_{ct}/0,9 = 0,333 f_{ck}^{2/3}$; $f_{ct} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$. |

2.3.3 Tartunta

Korroosion seurauksena tapahtuvan tartunnan heikkenemisen arvioimiseksi on kehitetty seuraavat lausekkeet

$$f_b = 4,75 - 4,64 P_x, \quad \text{jos } \rho > 0,25 \quad (6)$$

$$f_b = 10,04 + [-6,62 + 1,98 \cdot (\rho/0,25)] \cdot [1,14 + P_x], \quad \text{jos } \rho < 0,25 \quad (7)$$

$$\rho = n \cdot [(\phi_w - \alpha \cdot P_{xw}) / \phi]^2$$

missä f_b on tartuntajännitys, MPa
 P_x pääraudoituksen tankojen keskimääräinen korroosion syvyys, mm
 P_{xw} poikittaisen raudoituksen tankojen keskimääräinen korroosion syvyys, mm
 ϕ pääraudoituksen tankojen halkaisija, mm
 ϕ_w poikittaisen raudoituksen tankojen halkaisija, mm
 α 2 (poikittaisten tankojen syöpyminen tasaista)
 ≤ 10 (poikittaisten tankojen syöpyminen pistemäistä)
 n poikittaisten tankojen lukumäärä pääraudoituksen ankkurointi alueella.

Jos hakoja ei ole, tartuntalujuuden jäännösarvo voidaan arvioida seuraavasta lausekkeesta

$$f_b = 2,50 - 6,62 \cdot P_x \quad (8)$$

Jos raudoitustangot on ankkuroitu puristetulle tukialueelle, tartuntalujuuden jäännösarvo voidaan arvioida lausekkeesta

$$f_b = (4,75 - 4,64 \cdot P_x) / (1 - 0,08 \cdot p) \quad (9)$$

missä p on ulkoinen puristusjännitys (paine) tuella, MPa.

Kaikki edellä mainitut lausekkeet perustuvat koetuloksiin, joissa koekappaleiden raudoituksena on ollut harjatankoja. Jos käytetään sileitä tankoja, tartuntalujuudet pienenevät. Koska kokeellisia tuloksia ei ole käytettävissä, esitetään käytettäväksi reduktiokertoimena sileän ja harjatangon tartuntakertoimien suhdetta 1/2,25.

3 PAKKASVAURIO

3.1 Pakkasvaurion tyypit

Pakkasvaurio voidaan jakaa sisäiseen pakkasvaurioon ja suola-pakkasrapautumisen aiheuttamaan pintaosien rapautumiseen ja lohkeiluun.

Sisäinen pakkasvaurio vaikuttaa betonirakenteessa koko vaurioituneen poikkileikkauksen betonin ominaisuuksiin huonontaan niitä. Raudoituksen ominaisuuksiin sisäinen pakkasvaurio ei vaikuta. Betonin ominaisuuksien huononeminen heikentää kuitenkin raudoituksen tartuntaa betoniin.

Suola-pakkasrapautuminen vaikuttaa betonirakenteen ulkopintoihin. Suola-pakkasrapautuminen vaurioittaa ulkopintaa ja pinnan rapautumisen ja lohkeilun seurauksena betonipoikkileikkaus pienenee. Suola-pakkasrapautuminen ei aiheuta betoniin sisäisiä vaurioita, ts. pintaosia lukuunottamatta betonin ominaisuudet eivät muualla rakenteessa huonone.

Saavuttaessaan raudoituksen tasan suola-pakkasrapautuminen vaikuttaa luonnollisesti raudoituksen korroosion käynnistymiseen ja edelleen raudoituksen korroosion etenemisnopeuteen.

3.2 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus betonin ominaisuuksiin

3.2.1 Yleistä

Sisäinen pakkasvaurio vaikuttaa betonin mekaanisiin ominaisuuksiin. Mitä suurempi on kriittisen kosteuspitoisuuden ylitys betonin jäätyessä, sitä suurempi on betonin mekaanisten ominaisuuksien huononeminen.

Sisäisen pakkasvaurion seurauksena betonin eri ominaisuuksien huononemisen välillä ei ole olemassa vakio riippuvuutta. Vetolujuuden tai tartuntalujuuden suhteellinen pieneneminen voi olla huomattavasti suurempi kuin puristuslujuuden pieneneminen. Sama koskee esimerkiksi kimmomoduulia, kimmoduulin pieneneminen on suhteellisesti paljon suurempi kuin puristuslujuuden.

Erityisen ongelmallinen on sisäisen pakkasvaurion vaikutus tartuntalujuuteen, sillä betonin ominaisuuksien ohella tartuntalujuuteen vaikuttavat mm. haat, tartuntapituus ja raudoitustankoon vaikuttava kuormitus /2/.

Sisäisen pakkasvaurion vaikutus betonin eri ominaisuuksiin riippuu useista tekijöistä kuten betonin koostumuksesta, lujuudesta, vesi-sementtisuhteesta, ilmamäärästä, jäätymisnopeudesta, lämpötilasta, vedelläkyllästysasteesta jne. Sisäisen pakkasvaurion vaikutusta betonin eri ominaisuuksiin on tutkittu vähän.

Seuraavassa esitetään Lundin yliopistossa tehtyjen kokeiden tuloksia sisäisen pakkasvaurion vaikutuksesta betonin tärkeimpiin ominaisuuksiin. Tutkittavat ominaisuudet määritettiin ennen jäädytys-sulatuskoetta ja sen jälkeen. Kokeissa koekappaleiden vesi-sementtisuhteet vaihtelivat.

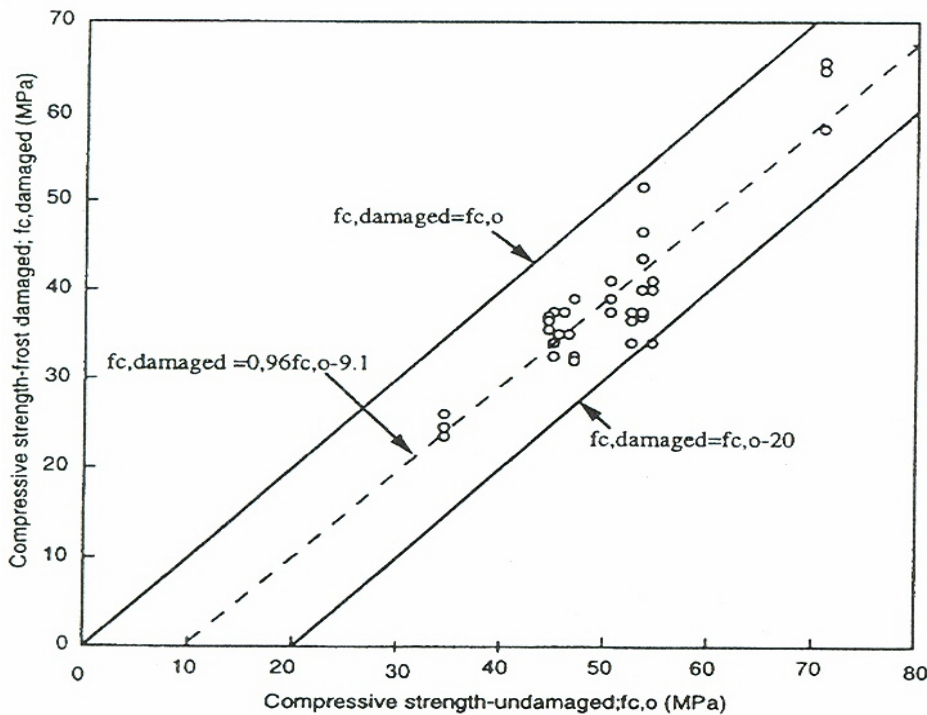
Voimakkaimman mahdollisen sisäisen pakkasvaurion aikaansaamiseksi koekappaleet kyllästettiin tyhjiökäsittelyä käyttäen. Painetta säätämällä koekappaleihin saatiin eri kyllästysasteita. Suurin kyllästysaste vastasi tilannetta, jossa koekappaleet olivat lähes täydellisesti kyllästyneet. Todennäköisesti näin voimakkaita sisäisiä pakkasvauriota ei todellisessa rakenteessa voi esiintyä /2/.

3.2.2 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus puristuslujuuteen

Koetuloksiin perustuva pakkasvaurioituneen ja vaurioitumattoman betonin puristuslujuuden välinen riippuvuus on esitetty kuvassa 9. Pakkasvaurioituneen ja vaurioitumattoman betonin puristuslujuuden väliselle riippuvuudelle on tulosten perusteella saatu seuraava lauseke

$$f_{c,d} = 0,96 \cdot f_{c,0} - 9,1 \quad (10)$$

missä $f_{c,d}$ on pakkasvaurioituneen betonin puristuslujuus, MPa
 $f_{c,0}$ vaurioitumattoman betonin puristuslujuus, MPa
 9,1 koetuloksiin perustuva arvo, MPa.



Kuva 9. Vaurioituneen ja vaurioitumattoman betonin puristuslujuuden suhde /2/.

Keskimääräinen puristuslujuuden pieneneminen oli noin 10 MPa. Keskimääräinen suhteellinen lujuuskato on siten suurempi alemman lujuuden omaavalla betonilla.

Lausekkeen (10) perusteella voidaan lujuuskadon ja alkuperäisen lujuuden suhteelle esittää seuraava likimääräinen lauseke

$$\Delta f_c / f_{c,0} \approx 10 / f_{c,0} \quad (11)$$

missä Δf_c on pakkasvaurion aiheuttama lujuuskato, MPa.

Sisäisesti pakkasvaurioituneen betonin puristuslujuuden alaraja voidaan määrittää lausekkeesta

$$f_{c,d} = f_{c,0} - 20 \quad \text{kun } f_{c,0} > 35 \text{ MPa}$$

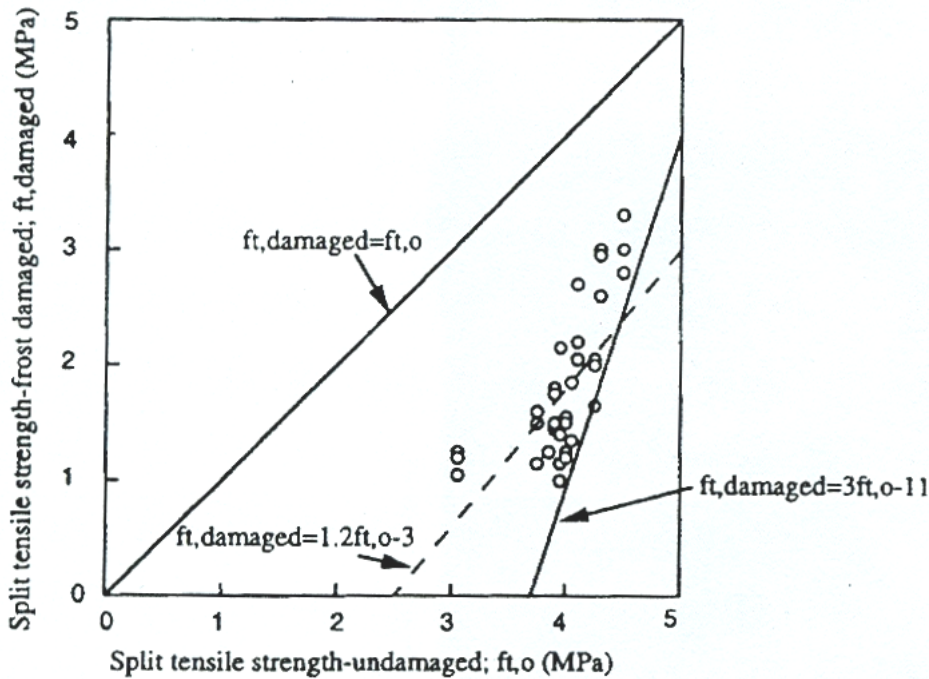
Pienin puristuslujuuden arvo 24 Mpa saatiin betonilla jonka alkuperäinen lujuus oli 35 Mpa. Suurin kokeissa todettu lujuuskato oli 35 %.

3.2.3 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus halkaisuvetolujuuteen

Koetuloksiin perustuva pakkasvaurioituneen ja vaurioitumattoman betonin halkaisuvetolujuuden välinen riippuvuus on esitetty kuvassa 10. Regressioanalyysiä käyttäen saatiin vaurioituneen ja vaurioitumattoman betonin halkaisuvetolujuuden väliselle riippuvuudelle seuraava lauseke

$$f_{t,d} = 1,2 \cdot f_{t,0} - 3 \quad (13)$$

missä $f_{t,d}$ on pakkasvaurioituneen betonin halkaisuvetolujuus, MPa
 $f_{t,0}$ vaurioitumattoman betonin halkaisuvetolujuus, MPa.



Kuva 10. Vaurioituneen ja vaurioitumattoman betonin halkaisuvetolujuuksien suhde /2/.

Jos vaurioitumattoman betonin halkaisuvetolujuus on pienempi kuin 2,5 MPa, on edellä olevan lausekkeen mukaan vaurioituneen betonin halkaisuvetolujuus nolla.

Lausekkeen (13) perusteella saadaan keskimääräiselle halkaisuvetolujuuden lujuuskadolle seuraava lauseke

$$\Delta f_t / f_{t,0} \approx 3 / f_{t,0} - 0,2 \quad (14)$$

missä Δf_t on pakkasvaurion aiheuttama halkaisulujuuden lujuuskato, MPa.

Pakkasvaurioituneen betonin halkaisuvetolujuuden alaraja voidaan määrittää lausekkeesta

$$f_{t,d} = 3 \cdot f_{t,0} - 11 \quad (15)$$

Edellä olevan lausekkeen mukaan voimakkaasti pakkasvaurioituneen betonin halkaisuvetolujuus on nolla, jos alkuperäinen halkaisuvetolujuus on pienempi kuin 3,7 MPa.

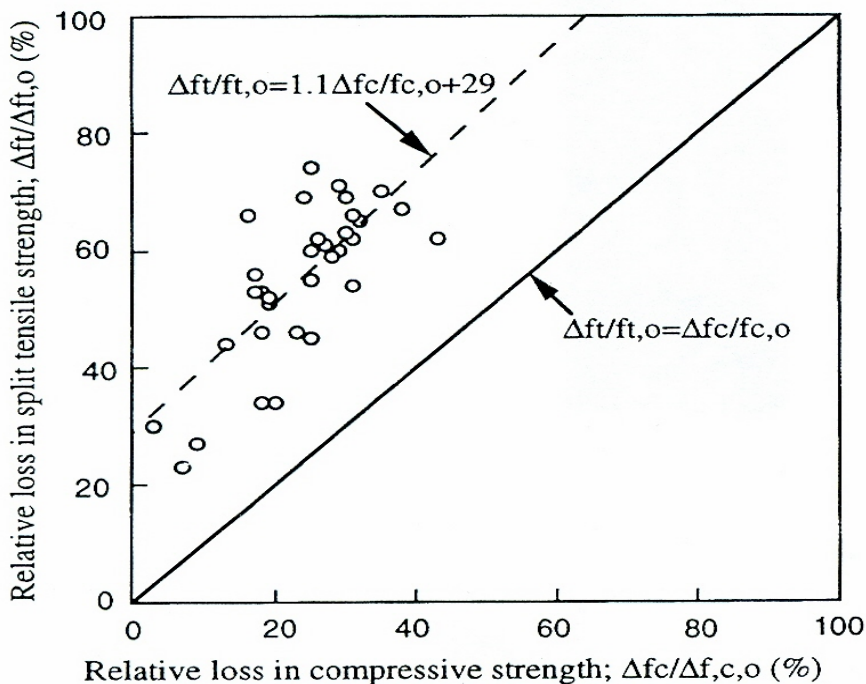
Tulosten mukaan pakkasvaurio voi aiheuttaa erittäin suuren halkaisuvetolujuuden pienenemisen. Pienin saatu halkaisuvetolujuus oli 1 MPa betonilla, jonka halkaisuvetolujuus vaurioitumattomana oli 3 MPa. Suurin todettu lujuuskato oli 70 %.

3.2.4 Halkaisuvetolujuuden pienenemisen suhde puristuslujuuden pienenemiseen

Sisäinen pakkasvaurio pienentää halkaisuvetolujuutta huomattavasti enemmän kuin puristuslujuutta. Kuvassa 11 on esitetty suhteellisen vetolujuuden pienenemisen riippuvuus suhteellisen puristuslujuuden pienenemisestä. Riippuvuudelle on voimassa seuraava keskimääräinen lauseke

$$\Delta f_t / f_{t,0} = 1,1 \cdot (\Delta f_c / f_{c,0}) + 29 \quad (16)$$

missä $\Delta f_t / f_{t,0}$ halkaisuvetolujuuden suhteellinen muutos, %
 $\Delta f_c / f_{c,0}$ puristuslujuuden suhteellinen muutos, %.

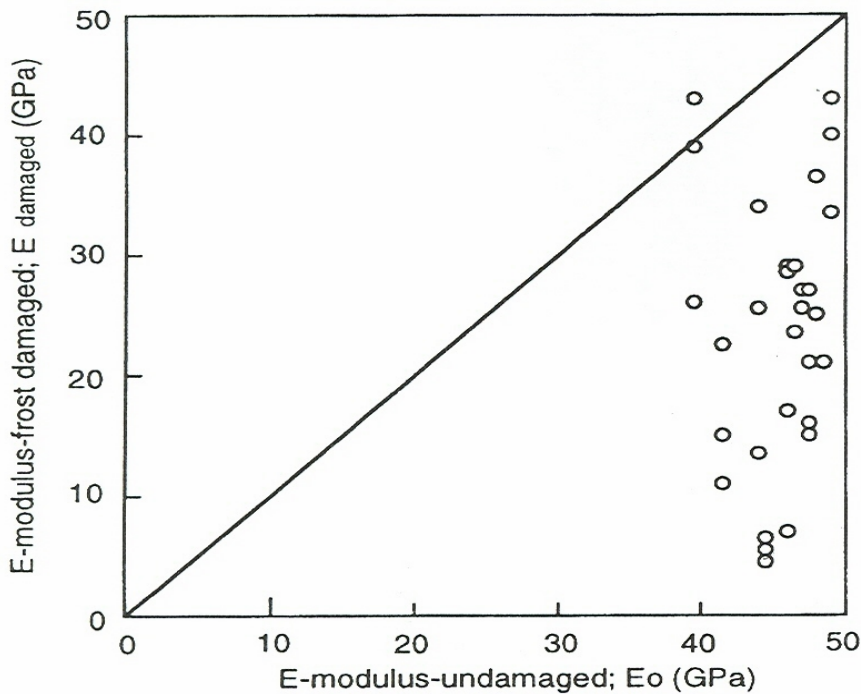


Kuva 11. Suhteellisen halkaisuvetolujuuden pienenemisen riippuvuus suhteellisen puristuslujuuden pienenemisestä /2/.

3.2.5 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus kimmomoduuliin

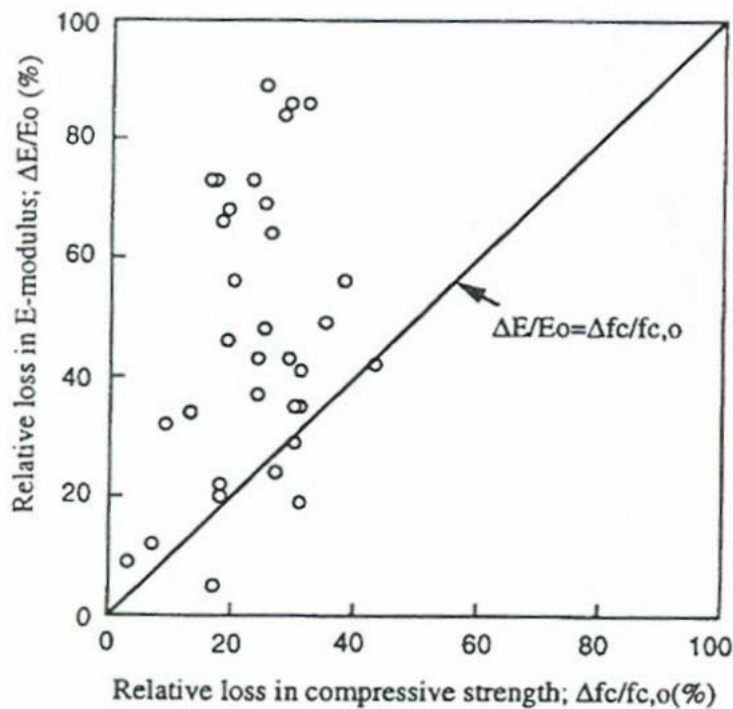
Kuvassa 12 on esitetty vaurioitumattoman betonin ja pakkasvaurioituneen betonin dynaamisen kimmomoduulin suhde. Tulosten perusteella vaurioituneen betonin kimmomoduulille on mahdotonta esittää mitään luotettavaa lausekkeen muodossa olevaa riippuvuutta. Kimmomoduulin pieneneminen voi olla erittäin suuri, joidenkin betonien kimmomoduuli voi hävitä melkein kokonaan. Pienin mitattu kimmomoduuli oli 5 Gpa.

Staattinen kimmomoduuli on ilmeisesti jonkin verran suurempi kuin määritetty dynaaminen kimmomoduuli, sillä puristuslujuuden pieneneminen ei kokeissa ollut suhteellisesti näin suuri. Betonissa, joka on menettänyt koheesionsa, värähtelyjen eteneminen on huonoa. Dynaaminen kimmomoduuli antaa paremman kuvan rakenteen jäykkyydestä kuin staattinen kimmomoduuli, sillä dynaamisessa kimmomoduulissa käy ilmi sisäinen halkeilu.



Kuva 12. Vaurioitumattoman betonin ja pakkasvaurioituneen betonin dynaamisen kimmomoduulin suhde /2/.

Kuvassa 13 on esitetty kimmomoduulin suhteellisen pienenemisen riippuvuus puristuslujuuden suhteellisesta pienenemisestä. Lähes kaikissa tapauksissa kimmomoduulin pieneneminen on huomattavasti suurempi kuin puristuslujuuden pieneneminen.



Kuva 13. Kimmomoduulin suhteellisen pienenemisen riippuvuus puristuslujuuden suhteellisesta pienenemisestä /2/.

3.2.6 Sisäisen pakkasvaurion vaikutus tartuntaan

Tartuntavoimalla tarkoitetaan seuraavassa saavutettua suurinta voiman arvoa tartuntakokeessa, jossa tanko on vedetty ulos betonikuutiosta. Kokeessa betonipeitteen ja hakojen vaikutus ei tule ilmi.

Kuvassa 14 on esitetty tartuntakokeessa vaurioituneesta betonista saadun tartuntavoiman riippuvuus vaurioitumattomasta betonista saatuun tartuntavoimaan. Lausekkeen muodossa keskimääräinen riippuvuus on likimäärin

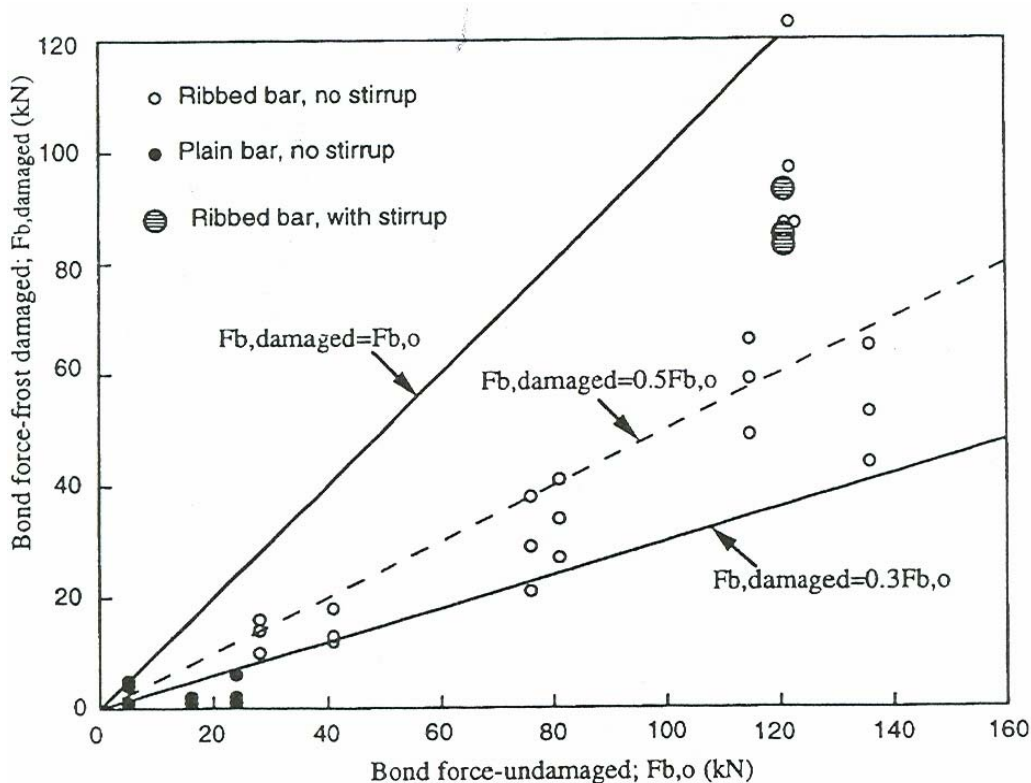
$$F_{b,d} \approx 0,5 F_{b,0} \quad (17)$$

missä $F_{b,d}$ tartuntavoima pakkasvaurioituneessa betonissa, kN
 $F_{b,0}$ tartuntavoima vaurioitumattomassa betonissa, kN.

Koska tangot olivat halkaisijaltaan ja geometrisilta ominaisuuksiltaan samanlaisia sekä tartuntapituudet oli yhtäpitkät, voidaan tartuntajännitykselle kirjoittaa edellisen lausekkeen perusteella suoraan seuraava lauseke

$$f_{b,d} \approx 0,5 f_{b,0} \quad (18)$$

missä $f_{b,d}$ tartuntajännitys pakkasvaurioituneessa betonissa, MPa
 $f_{b,0}$ tartuntajännitys vaurioitumattomassa betonissa, MPa.



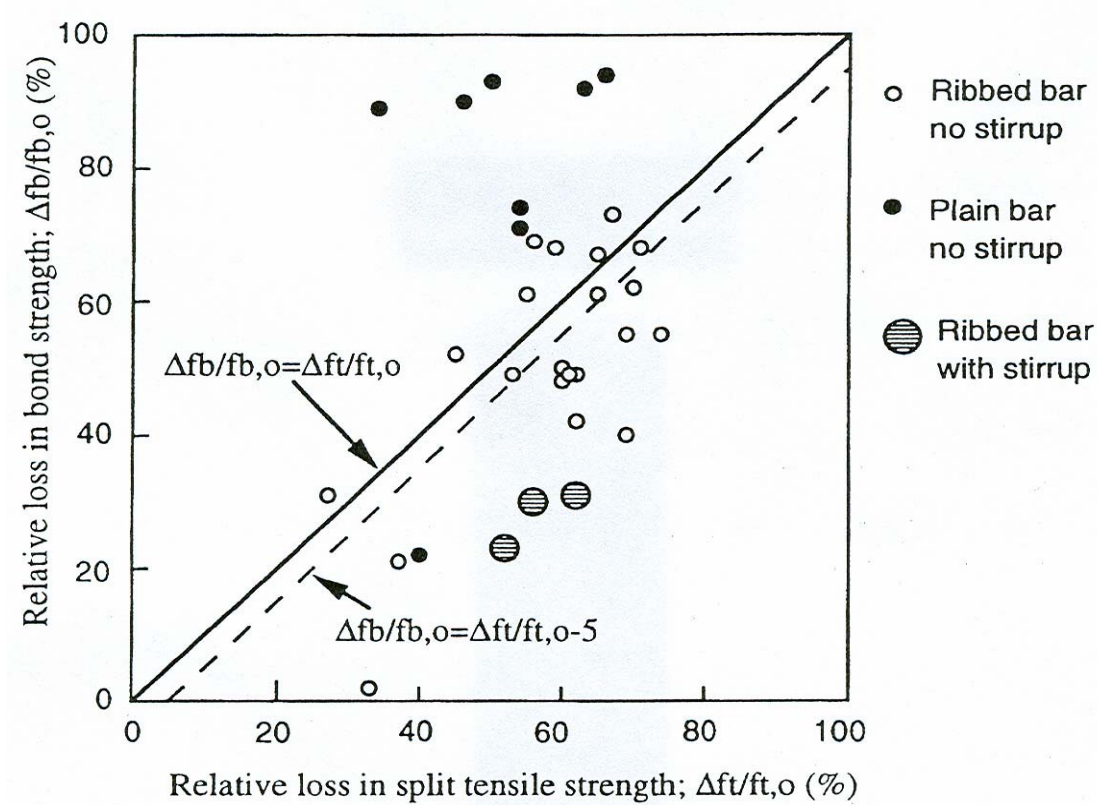
Kuva 14. Vaurioituneen betonin tartuntavoiman riippuvuus vaurioitumattoman betonin tartuntavoimasta /2/.

Keskimääräinen tartuntajännityksen lujuuskato on siten noin 50 %.

Tulosten perusteella tartuntajännityksen alaraja on likimäärin

$$f_{b,d} \approx 0,3 f_{b,0} \quad (19)$$

Suurin tartuntajännityksen lujuuskato oli noin 70 %. Kokeissa saatu pienin tartuntajännityksen arvo oli 3,4 MPa.



Kuva 15. Suhteellisen tartuntajännityksen pienenemisen riippuvuus suhteellisen halkaisulujuuden pienenemisestä /2/.

Sisäisesti pakkasvaurioituneessa betonissa sileiden tankojen tartuntalujuus häviää melkein kokonaan. Koetulosten perusteella tartuntalujuuden aleneminen on 90 % tai enemmän. Pienin todettu aleneminen oli 70 %. Käytännössä tämä merkitsee sitä että tartuntalujuuden jäännösarvo on lähes olematon (nolla).

Hakojen vaikutuksesta sisäisesti pakkasvaurioituneen betonin tartuntalujuuteen on olemassa erittäin vähän koetuloksia. Muutamien koetulosten (kuvat 14 ja 15) perusteella näyttää siltä, että suurin pieneneminen rajoittuu noin 30 %:iin.

3.3 Pakkasvaurion vaikutuksen arviointi kantavuuteen

3.3.1 Kantavuuden arvioinnin perusteet

Rakenteen kantavuuden arviointi tehdään mitoittamalla rakenne uudelleen käyttäen todellisia kuormia ja mahdollisimman tarkkoja vaurioituneen rakenteen materiaaliominaisuuksia. Mitoituslaskelmat tehdään noudattaen voimassaolevia määräyksiä ja ohjeita. Mitoitus tehdään eniten rasitetuissa poikkileikkauksissa ja poikkileikkauksissa, joissa vauriot ovat suurimmat.

Jos betoni on vaurioitunut, otetaan laskelmissa huomioon betonin muuttuneet ominaisuudet. Jos samanaikaisesti raudoituksen korroosio on käynnissä, otetaan lisäksi huomioon tapauksesta riippuen korroosion vaikutus, kuten raudoituksen poikkileikkausalan pieneneminen.

Jos kysymyksessä on betonin sisäinen pakkasvaurio, on laskelmissa otettava huomioon rakenteen mahdolliset jäykkyyden muutokset. Rakenteen jäykkyyden muutokset vaikuttavat voimasuureiden jakautumiseen, jolloin rasitukset joissakin poikkileikkauksissa kasvavat suuremmiksi kuin alkuperäisessä vaurioitumattomassa rakenteessa.

Jännitetyssä rakenteessa sisäinen pakkasvaurio on erittäin vaarallinen, koska sisäinen pakkasvaurion seurauksena betonin kimmomoduulin pieneneminen voi olla huomattavan suuri. Kimmomoduulin pienenemisen seurauksena huomattava osa jännevoimasta voi hävitä.

Suola-pakkasrapautuminen ei vaikuta jännitetyn rakenteen toimintaan sen enempää kuin tavanomaisella raudoituksella raudoitettun teräsbetonirakenteen toimintaan. Tämä sillä edellytyksellä, että suola ei ole vaikuttanut jänneteräksiin.

3.3.2 Sisäisen pakkasvaurion vaikutuksen arviointi

Sisäisen pakkasvaurion ollessa kysymyksessä kantavuutta arviotaessa on betonin muuttuneet ominaisuudet otettava huomioon laskelmissa. Muilta osin mitoituslaskelmat tehdään noudattaen voimassaolevia määräyksiä ja ohjeita.

Betonin materiaaliominaisuudet voidaan määrittää tutkittavasta rakenteesta otettuihin näytteisiin perustuen. Toinen mahdollisuus on käyttää materiaaliominaisuuksille alaraja-arvioita, jotka on saatu voimakkaasti pakkasvaurioituneelle betonille.

Suosittelava on käyttää tutkittavasta rakenteesta vaurioituneista ja vaurioitumattomista kohdista otettuja näytteitä, sillä alaraja-arvot ovat erittäin pieniä. Käyttämällä betonin materiaaliominaisuuksille alaraja-arvoja, saadaan liian epäedullinen kuva rakenteen todellisesta kantavuudesta /3/.

Näytteitä on otettava yleensä useasta kohdasta tutkittavaa rakennetta, sillä vaurion voimakkuus voi vaihdella rakenteen eri kohdissa. Näytteiden määrä on harkittava tapauskohtaisesti.

Koetuloksista tutkittavan suureen karakteristinen arvo määritetään normaalisti ottamalla huomioon hajonta lausekkeesta

$$f_{ch} = m - k \cdot \sigma \quad (20)$$

missä f_{ch} on tutkittavan suureen karakteristinen arvo
 m keskiarvo
 σ hajonta
 k kerroin.

Alaraja arviona voimakkaasti pakkasvaurioituneen betonin puristuslujuudelle saadaan lausekkeesta

$$f_c = f_{c,o} - 20 \quad (21)$$

missä f_c on pakkasvaurioituneen betonin karakteristinen puristuslujuus, MPa
 $f_{c,o}$ vaurioitumattoman betonin karakteristinen puristuslujuus, MPa
20 koetuloksiin perustuva arvo, MPa.

Vaurioitumattoman betonin karakteristinen puristuslujuus $f_{c,o}$ saadaan rakenteen vaurioitumattomasta osasta otetuista näytteistä tai rakenteen valmistuksen aikaisista koetuloksista, jos niitä löytyy.

Alaraja-arvo pakkasvaurioituneen betonin halkaisuvetolujuudelle voidaan määrittää lausekkeesta

$$f_t = 3 \cdot f_{t,o} - 11 \quad (22)$$

missä f_t on pakkasvaurioituneen betonin karakteristinen halkaisuvetolujuus
 $f_{t,o}$ vaurioitumattoman betonin karakteristinen halkaisuvetolujuus
11 koetuloksiin perustuva arvo, MPa.

Vaurioitumattoman betonin karakteristinen halkaisuvetolujuus $f_{t,o}$ saadaan rakenteen vaurioitumattomasta osasta otetuista näytteistä tai rakenteen valmistuksen aikaisista koetuloksista. Edellä oleva lauseke antaa niin pieniä halkaisuvetolujuuden arvoja, että niitä tuskin voidaan käyttää mitoituksessa.

Suora vetolujuus on noin 80 % halkaisuvetolujuudesta.

Karakteristinen tartuntalujuus voidaan arvioida kahdella vaihtoehdoisella tavalla käyttäen mitattua halkaisuvetolujuutta. Laskelmissa käytetään alemman tartuntalujuuden antavaa tulosta.

Ensimmäisessä vaihtoehdossa keskimääräinen tartuntalujuuden pieneneminen on suoraan verrannollinen vetolujuuden pienenemiseen. Tartuntalujuus voidaan tällöin määrittää seuraavasta lausekkeesta

$$f_b = f_{b,o} \cdot (f_t/f_{t,o}) \quad (23)$$

missä f_b on pakkasvaurioituneen betonin karakteristinen tartuntalujuus, MPa
 $f_{b,o}$ vaurioitumattoman betonin karakteristinen tartuntalujuus, MPa
 f_t pakkasvaurioituneen betonin karakteristinen vetolujuus, MPa
 $f_{t,o}$ vaurioitumattoman betonin karakteristinen vetolujuus, MPa.

Vaurioitumattoman betonin karakteristinen tartuntalujuus määritetään vaurioitumattoman betonin vetolujuudesta.

Toisessa vaihtoehdossa käytetään suoraan tartuntalujuuden ja mitatun halkaisuvetolujuuden alaraja-arvojen suhdetta. Tartuntalujuus saadaan tällöin lausekkeesta

$$f_b = 3 \cdot f_t \quad (24)$$

missä f_b on mitattu karakteristinen halkaisuvetolujuus, MPa.

Tartuntalujuuden arvo voidaan määrittää myös keskimääräisen tartuntalujuuden ja halkaisuvetolujuuden välisen riippuvuuden perusteella. Sijoittamalla halkaisuvetolujuuden alaraja-arvo keskimääräisen tartuntalujuuden lausekkeeseen, saadaan sievennysten jälkeen

$$f_b = 10 \cdot f_{t,0} - 35 \quad (25)$$

missä $f_{t,0}$ on vaurioitumattoman betonin karakteristinen halkaisuvetolujuus, MPa
35 koetuloksiin perustuva arvo, MPa.

Edellä oleva lauseke antaa tartuntalujuudelle erittäin pienen arvon (tai arvon 0), ellei alkuperäinen halkaisuvetolujuus ole suuri.

Staattinen kimmomoduuli määritetään rakenteesta irrotetuista näytteistä normaalisti standardin mukaisin koejärjestelyin.

Dynaaminen kimmomoduuli voidaan määrittää rakenteesta mitatun äänen nopeuden perusteella. Dynaaminen kimmomoduuli voidaan muuntaa staattiseksi kimmomoduuliksi seuraavaa lauseketta käyttäen

$$E_{\text{stat}} = 0,85 \cdot E_{\text{dyn}} \quad (26)$$

Kuten aikaisemmin on todettu, vaurioitumattoman betonin ja sisäisesti pakkasvaurioituneen betonin kimmomoduulin välille ei ole voitu muodostaa yleistä riippuvuutta.

3.3.3 Suola-pakkasrapautumisen vaikutuksen arviointi

Suola-pakkasrapautumisen vaurioittaessa ainoastaan ulkopintaa, pienenee betonipoikkileikkaus pinnan rapautumisen seurauksena. Kantavuuden arviointi edellyttää tällöin, että rapautumisen syvyys ja jäännös-poikkileikkauksen pinta-ala tunnetaan rakenteen toiminnan kannalta eniten rasitetuissa poikkileikkauksissa. Rapautumisen suuruus ja jäännös-poikkileikkauksen mitat selvitetään mittaamalla rakenteesta.

Rakenteen kantavuus määritetään käyttäen hyväksytyjä mitoitusmenetelmiä ja poikkileikkausarvoina mitattuja jäännös-poikkileikkauksen arvoja. Betonin materiaaliarvoina käytetään todellisia määritettyjä arvoja tai alkuperäisiä arvoja.

Ankkurointialueilla mahdollisen rapautumisen seurauksena tapahtunut betonipeitteen pieneneminen otetaan huomioon raudoituksen ankkurointikapasiteettia määrättäessä.

4 YHTEENVETO

Betonisiltojen kantavuuteen meillä vaikuttavat rappeutumislmiöt ovat raudoituksen korroosio ja betonin pakkasvaurio. Pakkasvaurio voidaan jakaa sisäiseen pakkasvaurioon ja suola-pakkasrapautumisen aiheuttamaan pintaosien rapautumiseen ja lohkeiluun.

Raudoituksen korroosio vaikuttaa raudoitustankojen poikkileikkausalan pienenemiseen, raudoituksen mekaanisiin ominaisuuksiin, betonipeitteen halkeiluun ja raudoituksen tartuntaan. Raudoitustankojen pinta-alan pieneneminen vaikuttaa suoraan rakenteen kantavuuteen. Korroosio pienentää raudoitustankojen venymäominaisuuksia, mikä pienentää rakenteen sitkeyttä. Korroosion aiheuttaman halkeilun tartuntaa heikentävä vaikutus vaikuttaa rakenteen kantavuuteen, jos tartunta huononee ankkurointialueilla.

Arvioitaessa raudoituksen korroosion vaikutusta rakenteen kantavuuteen, saadaan yleensä varmallalla puolella oleva arvio kantavuudesta tavanomaisilla laskentamalleilla käyttämällä niissä raudoitustankojen redusoitua poikkipinta-alaa. Lisäksi taivutuskasiteettia laskettaessa puristuspuolen raudoituksen betonipeitettä ei huomioida ja leikkauskapasiteettia laskettaessa jätetään huomioonottamatta hakojen betonipeite kokonaan. Puristetuissa rakenneosissa puristuspuolen betonipeitettä ei huomioida.

Sisäinen pakkasvaurio vaikuttaa betonirakenteessa vaurioituneen poikkileikkauksen betonin ominaisuuksiin heikentäen niitä. Raudoituksen ominaisuuksiin sisäinen pakkasvaurio ei vaikuta. Betonin ominaisuuksien heikkeneminen huonontaa raudoituksen tartuntaa betoniin. Rakenteen kantavuutta arvioitaessa on betonin muuttuneet ominaisuudet otettava huomioon laskelmissa. Muilta osin mitoituslaskelmat tehdään noudattaen voimassaolevia määräyksiä ja ohjeita.

Betonin muuttuneet materiaaliominaisuudet voidaan määrittää tutkittavasta rakenteesta otettuihin näytteisiin perustuen. Toinen mahdollisuus on käyttää materiaaliominaisuuksille alaraja-arvioita, jotka on saatu voimakkaasti pakkasvaurioituneelle betonille. Suositeltava on käyttää tutkittavasta rakenteesta vaurioituneista ja vaurioitumattomista kohdista otettuja näytteitä, sillä alaraja-arvot ovat erittäin pieniä. Käyttämällä betonin materiaaliominaisuuksille alaraja-arvoja, saadaan yleensä aina liian epäedullinen kuva rakenteen todellisesta kantavuudesta.

Suola-pakkasrapautuminen vaikuttaa betonirakenteen ulkopintoihin. Suola-pakkasrapautuminen vaurioittaa ulkopintaa ja pinnan rapautumisen seurauksena betonipoikkileikkaus pienenee. Suola-pakkasrapautuminen ei yleensä aiheuta betoniin sisäisiä vaurioita. Saavuttaessaan raudoituksen tason suola-pakkasrapautuminen vaikuttaa luonnollisesti raudoituksen korroosion käynnistymiseen ja edelleen korroosion etenemisnopeuteen.

Suola-pakkasrapautuminen vaikutuksen arviointi kantavuuteen edellyttää, että rapautumisen syvyys ja jäännöspoikkileikkauksen pinta-ala tunnetaan rakenteen toiminnan kannalta eniten rasitetuissa poikkileikkauksissa. Rapautumisen määrä ja jäännöspoikkileikkauksen mitat on selvitettävä mittaamalla rakenteesta.

Vaurioituneen rakenteen alustavissa kantavuustarkasteluissa, jolloin ei ole käytettävissä tuloksia rakenteen materiaaliominaisuuksista ja mitoista, voidaan materiaaliominaisuuksiin ja mittoihin liittyvä epävarmuus ottaa huomioon suurentamalla näihin liittyviä varmuuskertoimia. Näiden suuruus riippuu mm. vauriokohtien sijainnista rakenteesta ja siltarakenteen tyypistä ja ne on harkittava tapauskohtaisesti.

LÄHTEET

/1/ Contecvet: A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures. Manual for assessing corrosion - affected concrete structures. Annex F. Structural assessment. EC Innovation Programme IN309021. British Cement Association, UK, 2002.

/2/ Contecvet: A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures. Manual for assessing concrete structures affected by frost. Annex E. Effect of internal frost damage on mechanical properties of concrete. EC Innovation Programme IN309021. British Cement Association, UK, 2002.

/3/ Contecvet: A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures. Manual for assessing concrete structures affected by frost. Annex H. Structural assessment - principles. EC Innovation Programme IN309021. British Cement Association, UK, 2002.

Espoo, 4.3.2005

Eero Punakallio
Erikoistutkija

Pertti Pitkänen
Erikoistutkija

JAKELU

Tilaaaja
VTT/Arkisto

Alkuperäinen
Alkuperäinen