



Muotoiluvalun ongelmat ja laatuvaatimukset

Tilaaaja: Tiehallinto
Valtion ydinjätehuoltorahasto
Ratahallintokeskus
Helsingin kaupungin rakennusvirasto
Espoon kaupunki
Tampereen kaupunki



Tilaja	Tiehallinto, Siltatekniikka PL 33 00521 HELSINKI Valtion ydinjätehuoltorahasto Kauppa- ja teollisuusministeriö PL 32 00023 VALTIONEUVOSTO Ratahallintokeskus PL 185 00101 HELSINKI Helsingin kaupungin rakennusvirasto PL 1515 00099 HELSINGIN KAUPUNKI Espoo kaupunki, Tekninen keskus PL 4 02070 ESPOO Tampereen kaupunki, Katu- ja vihertuotanto Viinikankatu 42 33800 TAMPERE
Tilaus	178/2000/20/70 ad7/2004/SAF 246041 4580010775 4.3.2005, pöytäkirjanote 1356 / 241 / 2005 YPA/3799/652/04
Yhteyshenkilö VTT:ssä	VTT Erikoistutkija Pertti Pitkänen Lämpömiehenkuja 2, Espoo PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 6916 Faksi 020 722 7055 Sähköposti pertti.pitkanen@vtt.fi

Tehtävä **Muotoiluvulun ongelmat ja laatuvaatimukset**

TIIVISTELMÄ

Tässä kirjallisuuteen perustuvassa tutkimusraportissa tarkastellaan muotoiluvalun tartuntaan ja halkeiluun vaikuttavia tekijöitä. Liikenteen aiheuttamien värähtelyjen osalta tarkastellaan lyhyesti värähtelyjen vaikutusta kovettuvaan betoniin ja esitetään tärkeimmät tulokset Puistolän sillalla sen korjaustyön aikana tehdystä värähtelymittauksesta. Lopuksi tarkastellaan muotoiluvalulle asetettavia laatuvaatimuksia ja arvioidaan vaatimusten saavuttamista.

Kansilaatan yläpintaa joudutaan korjaamaan muotoiluvaluilla usein vedeneristysalustan korjausten yhteydessä, jolloin vaurioitunut betoni joudutaan poistamaan ja korvaamaan uudella. Muotoiluvalu on tyypillinen päällevalu, jossa aikaisemmin valettu ja kutistunut alusta estää päällevalun kutistumista. Kutistumisen estyminen aiheuttaa muotoiluvalussa halkeilua. Halkeiluun liittyy usein muotoiluvalun irtoaminen alustastaan.

Muotoiluvalun tartuntaan alustaan vaikuttavat alustan betonin kunto ja käsittely purkamistyön aikana sekä alustan puhtaus ennen valua ja valun tiivistys. Hyvän ja kestävä tartunnan kannalta alustan puhtaus ja valun tiivistys ovat tärkeimmät tekijät.

Halkeilua aiheuttavat varhaisvaiheessa betonin plastisessa tilassa tapahtuva kutistuminen ja myöhemmin kuivumisesta johtuva kutistuminen. Varhaisvaiheessa tapahtuvan halkeilun estämisen kannalta jälkihoidon suoritus on avainasemassa. Kuivumisesta johtuvan kutistuman aiheuttaman halkeilun estämisen kannalta ovat keskeisiä betonin kutistuman suuruus ja viruma, joka pienentää huomattavasti samanaikaisesti kutistuvaan päällevaluun syntyviä vetojännityksiä ja halkeamariskiä, jos valun jälkeiset muodonmuutokset tapahtuvat hitaasti.

Liikenteen aiheuttaman värähtelyllä ei useiden selvitysten mukaan näytä olevan merkittävää vaikutusta korjausvalujen halkeiluun ja tartuntaan. Merkittävämpää värähtelyä aiheuttaa raskas liikenne, muun liikenteen aiheuttaman värähtelyn vaikutus on merkityksetön. Värähtelyjen syynä on pääasiassa epätasaisuudet sillan ajoradassa ja liikuntasauvojen vieressä. Värähtelyjen vaikutusten pienentämiseksi liikuntasauvojen vieressä sekä sillan ajoradassa olevat suuremmat epätasaisuuden on syytä tasoittaa ennen muotoiluvalua. Myös raskaan liikenteen nopeuden rajoitus on välttämätöntä jos ajoradan pinta on epätasainen.

Muotoiluvalun laatuvaatimukset koskevat lujuutta, pakkasenkestävyyttä, tartuntalujuutta alustaan, halkeamien leveyttä ja määrää, valun minimipaksuutta, viettokaltevuutta ja yläpinnan tasaisuusvaatimusta, joka riippuu käytettävästä eristysmateriaalista.

Vaatimusten osalta halkeilun hallinta on käytännössä vaikeimmin toteutettavissa. Muut vaatimukset, kuten hyvä ja kestävä tartunta alustaan, voidaan saavuttaa kun kaikki työvaiheet tehdään suunnitellusti ja huolellisesti. Olosuhteiden hallintaa voidaan parantaa käyttämällä sääsuojaa. Halkeamien estämiseksi tulevat kysymykseen kutistumista vähentävien lisäaineiden ja paisumista aiheuttavien lisäaineiden käyttöönottoa. Mainittuja aineita on kokeiltu ulkomailla ja tulokset ovat olleet hyviä. Näiden luotettava käyttö edellyttää kuitenkin vielä lisätutkimuksia. Varhaishalkeilun estämisen osalta tulisi selvittää betoniin sen sekoituksen yhteydessä lisättävän jälkihoitoaineen käyttö ja tehokkuus käytännössä.

ABSTRACT

This literature survey deals with the factors affecting the bond and cracking of an overlay on a bridge deck. The effect of traffic induced vibration on hardening concrete is discussed briefly and the main results of the vibration measurements carried out during repair work of Puistola bridge are presented. Finally the quality requirements of the overlay are considered.

When the waterproofing of a bridge deck is repaired the damaged overlay concrete must often also be removed and replaced. The new layer is a typical overlay: the substrate has already shrunk and therefore restrains the shrinkage of the new overlay. Restrained shrinkage causes cracking which is often accompanied by bond failure.

The bond between the substrate and the new overlay depends to some extent on the soundness and surface treatment of the substrate but mainly on the cleanness of the substrate and compaction of the overlay.

At the early age cracking is caused by plastic shrinkage and at later age by drying shrinkage. Curing is vitally important in preventing early age cracking. The essential factors affecting cracking are drying shrinkage and creep. If the rate of shrinkage of the overlay is slow creep considerably reduces tensile stresses and thus diminishes the cracking risk.

According to several surveys traffic induced vibrations do not seem to have significant effect on either cracking or adhesion. Only heavy traffic causes significant vibration, the effect of other traffic being meaningless. Vibration is mainly caused by the roughness of the bridge carriageway and next to the construction joints. Large roughness should be roughed off before casting the overlay. In the case of a rough bridge deck it is necessary to set a speed limit for heavy traffic.

The quality requirements of the overlay concern the strength, frost resistance, bond, crack widths and quantity, minimum thickness, slope and smoothness. The last mentioned depends on the waterproofing material.

The requirement to control cracking is very difficult to fulfil in practice. The rest of the requirements, such as good and durable bond, can be achieved when each working phase is carefully carried out as planned. Using weather guard helps to control the conditions during casting. Drying shrinkage reducing admixtures and expansive additives can be used to reduce cracking. Such agents are being tested abroad with promising results. However the safe use of such agents requires additional research. Also the effectiveness of internal curing agents in reducing early age cracking should be studied in practice.

SAMMANDRAG

I denna på litteratur baserade forskningsrapport betraktas faktorer som påverkar pågjutningens vidhäftning och sprickbildning. Vibrationer förorsakade av trafik och dess inverkan på hårdnande betong behandlas kort. De viktigaste resultaten av vibrationsmätningarna som gjordes under reparationsarbetet på Puistola bro presenteras. Slutligen behandlas kvalitetskraven som kan ställas på pågjutningen och huruvida kraven kan uppnås.

Samtidigt som membranisoleringens underlag på brodäcket repareras måste ofta också den skadade betongen avlägsnas och ersätts. Det nya betongskiktet är en typisk pågjutning där tidigare gjutet underlag förhindrar pågjutningens krympning och förorsakar sprickor i pågjutningen som ofta leder till lossnandet av pågjutningen.

Underlagsbetongens skick och behandling under rivningen samt underlagets renhet och pågjutningens komprimering påverkar pågjutningens vidhäftning till underlaget. Underlagets renhet och pågjutningens komprimering är de viktigaste faktorerna när man eftersträvar god och beständig vidhäftning.

I nygjuten betong förorsakas sprickor av krympning av betong i plastiskt tillstånd och senare torkningskrympning. För att undvika sprickornas uppkomst i nygjuten betong har efterbehandlingen en nyckelposition. Krympningens storlek och krypning är de viktigaste faktorerna som påverkar sprickbildning i pågjutning. Krypningen minskar betydligt dragspänningarna och sprickrisken i pågjutningen om deformationerna efter gjutningen sker långsamt.

Vibrationer förorsakade av trafiken har enligt åtskilliga studier ingen betydande inverkan på pågjutningens sprickbildning och vidhäftning. Den tunga trafiken förorsakar betydelsefulla vibrationer, effekten av den övriga trafiken är obetydlig. Orsaken till vibrationerna är huvudsakligen ojämnheter i beläggningen och vid rörelsefogar. Större ojämnheter i beläggningen och vid rörelsefogar bör utjämnas före pågjutningen. Hastighetsbegränsning för den tunga trafiken är också nödvändig, om körbanan är ojämn.

Pågjutningens kvalitetskrav gäller hållfasthet, frostbeständighet, vidhäftning till underlag, sprickornas bredd och mängd, gjutningens minimitjocklek, resulterande lutning och ytans jämnhet, som igen beror på isoleringsmaterialet som används.

Kvalitetskraven berörande sprickor är i praktiken svårast att genomföra. De andra kraven, såsom god och beständig vidhäftning till underlag, kan uppnås då alla arbetsfaser görs enligt plan och noggrant. Omständigheterna kan behärskas genom att använda väderskydd. För att förhindra sprickor, kommer det i fråga att använda tillsatsmedel som reducerar krympning och åstadkommer svällning. Ovannämnda tillsatsmedel har prövats utomlands och resultaten har varit goda. En pålitlig användning av dessa förutsätter ännu kompletterande undersökningar. I fråga om efterbehandlingstillsatsmedler som blandas i betongen med avsikt att hindra tidig sprickning bör effekten undersökas i praktiken.

ALKUSANAT

Muotoiluvalun ongelmat ja laatuvaatimukset on yksi vuoden 2004 - 2005 aikana VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa toteutetuista *Betoniteknillisiin siltatutkimuksiin* kuuluvista tutkimuksista. *Betoniteknilliset siltatutkimukset* on Tiehallinnon, Ratahallintokeskuksen, Helsingin kaupungin rakennusviraston, Valtion ydinjätehuoltorahaston (Säteilyturvakeskuksen), Espoon kaupungin teknisen keskuksen ja Tampereen kaupungin katuyksikön rahoittamaa jatkuvaa projektitoimintaa, joka koostuu useista osatutkimuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SAMMANDRAG	4
ALKUSANAT	5
1 YLEISTÄ	7
2 MUOTOILUVALUN ONGELMAT	7
3 MUOTOILUVALUN BETONIKOOSTUMUKSIA	8
4 MUOTOILUVALUN HALKEILUUN JA TARTUNTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	9
4.1 Alustan kunto ja käsittely	9
4.2 Betoni	11
4.3 Sääolosuhteet valun aikana	15
4.4 Betonityön suoritus.....	16
4.5 Liikenteen aiheuttamien värähtelyjen vaikutus.....	16
4.5.1 Värähtelyjen vaikutukset siltaan ja betoniin.....	16
4.5.2 Värähtelyä koskevia rajoja ja suosituksia.....	17
4.5.3 Liikenteen aiheuttaman värähtelyn mittaus korjauskohteessa.....	19
5 RUOTSISSA TEHTYJEN SILTOJEN KORJAUSVALUJEN TARTUNTA KOSKEVIEN TUTKIMUSTEN TULOKSIA	20
6 LAATUVAATIMUKSET JA NIIDEN SAAVUTTAMINEN	21
6.1 Muotoiluvalun laatuvaatimukset	21
6.2 Vaatimusten saavuttaminen.....	22
7 PARANNUSEHDOTUKSIA	23
8 YHTEENVETO	24
LÄHTEET	26

1 YLEISTÄ

Kansilaatan yläpintaa joudutaan korjaamaan muotoiluvaluilla jos yläpinta on valussa jäänyt epätasaiseksi, vedeneristysalustan kaltevuus ei ole riittävä vedenpoiston kannalta ja vedeneristysalustan korjausten yhteydessä, jolloin vaurioitunut betoni joudutaan poistamaan ja korvaamaan uudella. Vuodelta 1993 olevassa SILKO-ohjeessa "Vedeneristyksen alustan kunnostus" (2.240) on annettu ohjeita kansilaatan muotoiluvälusta /2/.

Muotoiluvälujen paksuus vaihtelee. Muotoiluvälut ovat yleensä ohuita, edellä mainitun SILKO-ohjeen mukaan niiden paksuuden on oltava vähintään 20 mm, korjausten yhteydessä paksuudet ovat olleet enimmillään yli 100 mm. Muotoiluvälujen pinta-ala vaihtelee pienalaisista paikkauksista aina koko sillan kannen ala. Vedeneristysalustan korjausten yhteydessä pinta-ala on tavallisesti sillan koko kansilaatan ala. Muotoiluvälussa esiintyneet keskeisimmät ongelmat ovat valun irtoaminen alustastaan ja halkeilu.

Muotoiluvälu on tyypillinen päällevalu, jossa aikaisemmin valettu alusta estää muotoiluvälun muodonmuutoksia. Muodonmuutoksia aiheuttavat plastisessa tilassa tapahtuva kutistuminen, lämpötilanmuutosten aiheuttamat lämpöliikkeet sekä betonin kuivumisesta johtuva kutistuminen. Alustan estäessä päällevälun muodonmuutoksia syntyy tähän rasituksia. Rasitusten suuruuteen vaikuttavat tartunta alustaan, muotoiluvälun käytettävän betonin ominaisuudet, ulkoiset olosuhteet valun aikana ja valun jälkeen sekä betonityön suorituksen laatu. Vetorasitusten kasvaessa päällevälussa riittävän suuriksi, on seurauksena halkeilua. Halkeiluun liittyy usein valun irtoaminen alustastaan halkeamien vierestä.

Seuraavassa tarkastellaan aluksi muotoiluvälun tartuntaan ja halkeiluun vaikuttavia tekijöitä. Liikenteen aiheuttamien värähtelyjen osalta tarkastellaan lyhyesti värähtelyjen vaikutusta kovettuvaan muotoiluvälun ja esitetään tärkeimmät tulokset ja johtopäätökset Puistolän sillalla sen korjaustyön aikana tehdystä värähtelymittauksesta. Lopuksi tarkastellaan muotoiluvälulle asetettavia laatuvaatimuksia ja arvioidaan vaatimusten saavuttamista.

2 MUOTOILUVALUN ONGELMAT

Muotoiluvälu on päällevalu, jonka yleisimmät laatua koskevat ongelmat ovat valun irtoaminen alustastaan ja halkeilu. Samat ongelmat koskevat tavanomaista korjausvälua.

Muotoiluvälun alustan muodostaa sillan aikaisemmin valettu kansilaatta tai vanha kansilaatta, jonka yläpinnasta huonokuntoinen betoni on poistettu. Muotoiluvälun halkeilun ja tartunnan kannalta ongelman muodostavat alustan ja päällevälun erilaiset muodonmuutokset ja jäykkyudet. Alustan muodostava vanha kansilaatta on kuivunut ja kutistunut. Massiivisuudesta johtuen alusta muodostaa käytännössä lähes "täysin jäykän esteen" muotoiluvälun muodonmuutoksille, joita aiheuttavat (suluissa karkea suuruusluokka)

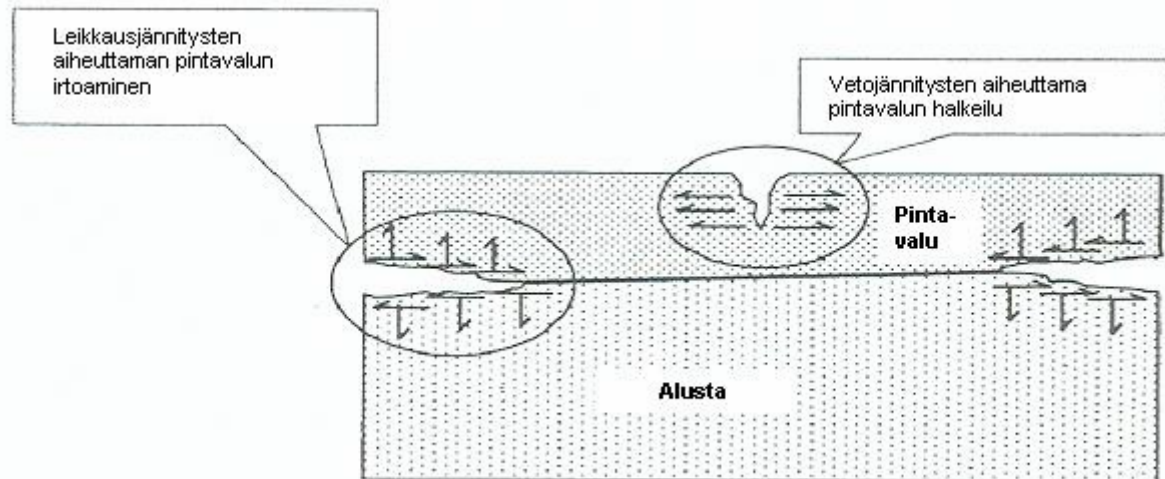
- plastisessa tilassa tapahtuva kutistuminen (0 - 2,0 ‰)
- betonin kuivumisesta johtuva kutistuminen (0,4 - 0,8 ‰)
- ulkoiset lämpötilamuutokset (0 - 1,0 ‰).

Autogeenisen kutistuman osuus on edellä jätetty pois, sillä se on muotoiluvälun yleisesti käytettyjen betonien koostumuksesta johtuen yleensä erittäin pieni.

Mainitut muodonmuutokset ovat huomattavasti suurempia ja tapahtuvat huomattavasti nopeammin kuin massiivisen alustan muodonmuutokset. Muodonmuutoserojen seurauksena muotoiluvälun ja sen saumakohtaan voi syntyä huomattavan suuria rasituksia, joiden seurauksena muotoiluvälun voi syntyä

halkeamia ja se voi irrota alustastaan. Siihen miten suuria rasituksia syntyy, vaikuttavat mainitut muodonmuutosten suuruudet ja miten nopeasti muodonmuutokset tapahtuvat.

Muotoiluvalun muodonmuutoksiin vaikuttavat betonin koostumus, olosuhteet valun aikana ja sen jälkeen sekä betonityön suorituksen laatu.



Kuva 1. Muotoiluvaluun syntyviä rasituksia ja vaurioita.

Olosuhteet valun aikana ja jälkihoidon laatu vaikuttavat siihen, miten paljon muotoiluvalu kutistuu plastisessa tilassa ja syntyykö jo tällöin halkeamia. Ohueen päällevaluun syntyy herkemmin plastisia kutistumishalkeamia kuin paksumpaan, jos haihtuminen on suurta ja jälkihoidon laatu on huono. Sääolosuhteista aiheutuvat lämpötilan ja kosteustilan muutokset vaikuttavat pinnassa olevaan muotoiluvaluun voimakkaammin ja nopeammin kuin alla olevaan massiiviseen alustaan. Muotoiluvalu kuivuu ja kutistuu normaalisti. Kutistumisen määrä ja nopeus riippuvat mm. betonin koostumuksesta, valun paksuudesta, jälkihoidosta ja olosuhteista valun jälkeen.

Halkeiluun liittyy usein irtoaminen alustastaan. Irtoamiskohta on tavallisesti halkeaman vieressä. Kokeuksesta tiedetään, että ohuempi päällevalu on irti alustastaan useammin kuin paksumpi.

3 MUOTOILUVALUN BETONIKOOSTUMUKSIA

Muotoiluvalussa käytetyn betonin lujuus on yleensä samaa suuruusluokkaa kuin alustan betonin. Valun pienestä paksuudesta johtuen kiviaineksen suurin raekoko on pieni ja pastamäärä yleensä suurehko. Monesti betonissa on käytetty muovi- tai teräskuituja halkeilun estämiseksi ja halkeamien leveyden rajoittamiseksi.

SILKO-ohjeen /2/ mukaan muotoiluvalu tehdään rakeisuudeltaan sopivalla vakiobetonilla. Mainitussa ohjeessa on annettu myös eräs muotoiluvaluun sopivan polymeerimodifioidun betonin koostumus. Mainitun betonin tavoitelujuus on K35 ja tavoitenotkeus 2-3 sVB. Sementin määrä 400 kg/m^3 , vesimäärä 174 l , polymeerin määrä 12 kg/l (Tarra-Povix Super) ja kuitujen määrä $0,9 \text{ kg/m}^3$ (polypropyleenikuidut). Koostumuksessa kiviaineksen suurin raekoko on 8 mm ja ilmamäärä 8% . Polymeeria on käytetty tartunnan parantamiseksi.

Juvan sillan kannen muotoiluvalussa /18/ käytetyn betonin lujuus oli K35 ja P-luku 30. Betonissa käytettiin polypropyleenikuituja $0,9 \text{ kg/m}^3$ ja tartuntaa parantavaa polymeeriä sisältävää lisäainetta 15 % sementin painosta. Kiviaineksen suurin raekoko oli 8 mm. Tarkemmin betonin koostumusta ei lähteessä ole annettu.

4 MUOTOILUVALUN HALKEILUUN JA TARTUNTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

4.1 Alustan kunto ja käsittely

Alustan kunto ja käsittely ennen valua vaikuttavat muotoiluvalun tartuntaan. Alustan käsittelyn ja kunnan osalta tartuntaan vaikuttavia tekijöitä ovat

- alustan betonin alkuperäinen lujuus ja kunto
- alustan karheus
- alustan lämpötila
- alustan kosteus
- mahdolliset käytetyt tartunta-aineet
- alustan puhtaus.

Vanhan alustan ollessa kysymyksessä vaurioitunut betoni poistetaan aina. Vaurioituneen poistetun betonin alla oleva hyväkuntoinen betoni muodostaa muotoiluvalun alustan.

Alustan lujuuteen ja kuntoon vaikuttavat alustabetonin alkuperäinen lujuus ja huonokuntoisen betonin poistamisen yhteydessä mahdollisesti syntyvät vauriot, lähinnä säröily ja hiushalkeiluhalkeilu. Vaurioiden suuruus riippuu pääasiassa käytetystä purkamismenetelmästä (piikkaus tai jyrshintä).

Alustan pinnan purkamiseen käytetään suositeltavuusjärjestyksessä seuraavia menetelmiä /2/:

- vesipiikkaus
- jyrshminen
- rajausta timanttisahalla ja piikkaus piikkausvasaralla (pienet alueet).

Betoniteknisiin siltatutkimuksiin kuuluvassa osatutkimuksessa vuonna 1997 selvitettiin eri piikkausmenetelmien vaikutusta alustan betonin pinnan karheuteen, säröilyyn ja päällevalun tartuntaan /16/. Tutkimuksessa todettiin tartuntalujuuden riippuvan jossain määrin säröilyisyvyydestä, erityisesti kun säröilyisyvyys on suuri.

Vuonna 2003 tehdyssä myös Betoniteknisiin siltatutkimuksiin kuuluvassa jyrshityn pinnan mikrohalkeilua koskevassa tutkimuksessa selvittiin pinnan säröilyn ja karheuden vaikutusta tartuntaan /11/. Tutkimuksessa jyrshimellä BEF 301 jyrshittiin koealueet kuuteen tavoitesyvyyteen (1 – 7 mm). Säröilyisyvyydet tässä tutkimuksessa olivat pienempiä kuin vuonna 1997 tehdyssä tutkimuksessa. Tulosten mukaan pinnan vetolujuus heikkeni jonkin verran jyrshintäsyvyyden kasvaessa, mutta tartuntalujuuteen jyrshintäsyvyydellä ei ollut vaikutusta. Ilmeisesti jyrshintäsyvyyden kasvun seurauksena tapahtunut pinnan karheuden kasvu kumosi lisääntyneen säröilyn johdosta tapahtuneen vetolujuuden pienen heikkenemisen.

Aikaisemmin piikkauksen aiheuttamaa säröilyn ja hiushalkeilun vaikutusta on joissakin tapauksissa pyritty poistamaan suorittamalla piikkauksen jälkeen hiekkapuhallus joko veden kanssa tai ilman /3/.

Uuden alustan muotoiluvalun (muodon korjausten tai paikkausten) ollessa kysymyksessä alustan yläpinnan lujuuteen vaikuttavat yläpinnassa mahdollisesti oleva sementtiliimakerros ja yläpinnan lujuus. Hyvän tartunnan saamiseksi huonon lujuuden omaavan sementtiliiman poistaminen on välttämätöntä.

Monesti yläpinnan lujuus on syvempänä olevaa betonia jonkin verran heikompaa. Tavallisia syitä ovat vedenerottumisesta johtuva yläpinnan suurempi vesi-sideainesuhde ja pienempi hydrataatioaste johtuen kosteuden haihtumisesta ja alhaisemmasta kovettumislämpötilasta yläpinnassa.

Tartuntapinnan karhentamisella on yleensä jälkivalun tartuntaa parantava vaikutus /10/. Osa parantavasta vaikutuksesta johtuu ilmeisesti karhentamisen yhteydessä tapahtuvasta "heikomman" huonokuntoisen yläpinnan poistamisesta.

Karheuden suurentamisen vaikutus jyrksintäsyvyyttä kasvattamalla riippuu käytetyn menetelmän betoniin aiheuttamasta mikrohalkeilusta ja säröilystä.

Alustan lämpötilan tulisi olla massan lämpötilaa korkeampi valun alussa. Tällöin alustan jäähtymisen aiheuttama kutistuminen pienentää kutistumiseroa sauman molemmilla puolilla. Lisäksi alustan jäähtyessä saumaan syntyy pientä alipainetta, mikä myötävaikuttaa sementtiliiman imeytymiseen alustaan /10/. Alustan lämpötilan lasku aiheuttaa lisäksi puristusta valun.

Yleinen vaatimus on että betonoitaessa alustan lämpötilan on oltava vähintään 5 °C. Koska viileissä olosuhteissa massan lämpötila on 5 °C:ta selvästi korkeampi, tulisi myös alustan lämpötilan olla mainittua lämpötilaa selvästi korkeampi. Käytännössä alustan lämpötila riippuu valuajankohdan sääolosuhteista.

Alustan kosteutta säätämällä on tarkoitus tasata alustan ja pintavalun erilaista kutistumista ja estää siitä johtuva saumakohdan lujuuden heikkeneminen. Tartunnan kannalta päällevalun suorittaminen eriasteisille kuiville pinnoille antaa yleensä parempia tuloksia kuin valu kostean pinnan päälle. Tällöin alusta kastellaan kauttaaltaan niin aikaisin (1 - 2 vrk) ennen valua, että kastelun jälkeen pinta ehtii kuivua. Kuivan tai pinnaltaan kuivan tartuntapinnan paremmuus johtuu kapillaari-ilmioista. Kuiva pinta imee kosteutta pintavalusta, jolloin saumakohdassa pintavalun vesisementtisuhde pienenee ja lujuus kasvaa. Imeytymisen yhteydessä kulkeutuu myös hienoja sementtipartikkeleita enemmän rajapintaan, jolloin niiden välimatka saumapinnalla pienenee mikä edesauttaa lujuuden kasvua /10/. Imeytyminen ei kuitenkaan saa olla niin suurta, että hydrataatio pysähtyy veden puutteeseen.

Tartunta-aineilla pyritään varmistamaan pintavalun tartuntaa alustaan. Oikein käytettynä tartunta-aineet parantavat tartuntalujuutta. Käytännössä lopputulos on ollut kuitenkin vaihteleva, joissakin tapauksissa tartuntalujuus on huonontunut. Kyseessä on tällöin ollut yleensä työvirhe. Tartunta-ainetta on levitetty kerralla liian laajalle alueelle ja se on päässyt kuivamaan ennen pintavalun levittämistä.

Jos tartunta-aineita käytetään, voidaan valita joko sementtipohjainen käsittely tai muovipohjaisten emulsioiden käyttö. Muoviemulsioita voidaan käyttää joko sellaisenaan tai niitä voidaan myös sekoittaa päällevalumassaan.

Yleensä riittävän hyvä tartunta alustaan saavutetaan ilman erityisiä tartunta-aineita. Tartuntasively tehdään muotoiluvalun betonimassaa käyttäen.

Alustan puhtaus on hyvän tartunnan välttämätön edellytys. Alusta on puhdistettava kaikesta tartuntaa heikentävästä irtonaisesta aineksesta ja liasta. Puhdistustoimet on tehtävä mahdollisimman lähellä valuajankohtaa.

Ruotsissa tehdyissä siltojen korjausvalujen tartuntaa koskevien tutkimusten mukaan alustan huono puhtaus oli toinen pääsyy tartunnan pettäessä saumasta /22/. Toinen oli valun riittämätön tiivistys.

4.2 Betoni

Halkeilun syntymisen estämiseksi muotoiluvalussa käytettävän betonin muodonmuutosten on oltava pieniä ja betonin muodonmuutoskyvyn riittävän suuri. Betonin muodonmuutoksiin ja halkeiluerkkyyteen vaikuttavat

- kutistumaominaisuudet
- muodonmuutosominaisuudet
- lämpötilakerroin ja
- betoniin lisätyt kuidut.

Kutistumaominaisuuksista kuivumiskutistumaa on pidetty eräänä pääsyistä päällevalujen halkeiluun ja alustasta irtoamiseen /19/. Varhaisvaiheessa (plastisessa tilassa ja lujuudenkehityksen alussa) tapahtuvaan kutistumaan ei ole yleensä kiinnitetty läheskään yhtä suurta huomiota. Tämä johtuu siitä, että jälkihoidon suorituksen laadulla ja valunaikaisilla sääolosuhteilla on varhaisvaiheen kutistumaan suurempi vaikutus kuin betonin laadulla. Jos kosteus pääsee haihtumaan varhaisvaiheessa betonin pinnalta, vaikuttaa tällöin myös betonin koostumus varhaisvaiheen kutistuman suuruuteen.

Muotoiluvaluissa käytettävien betonikoostumusten varhaishalkeiluerkkyys on yleensä samaa suuruusluokkaa kuin normaalibetonilla.

Betonin koostumus vaikuttaa merkittävästi sitoutumisajan pituuteen ja lujuudenkehityksen alkuhetkeen. Varhaisvaiheen halkeilun riski pienenee, jos betonin sitoutumisaika on lyhyt ja lujuudenkehitys alkaa varhain. Tämän johdosta varsinkin viileissä olosuhteissa betonoitaessa on betonin sitoutumisaikaan kiinnitettävä huomiota.

Kuivumiskutistuman suuruuteen ja nopeuteen vaikuttavat betonin koostumuksen ohella valun paksuus ja ympäristöolosuhteet. Betonikoostumuksen valinnalla on pyrittävä mahdollisimman pieneen loppukutistuman arvoon.

Kuivumiskutistumaa voidaan pienentää betonikoostumuksen valinnalla:

- valitaan vähän kutistuva sementtilaatu
- pienennetään vesimäärää
- käytetään suurta kiviaineksen raekokoa
- valitaan vähän vettä vaativa (runkoaine) ja sen jakautuma
- vedenvähennyistä tehtäessä ei käytetä liian suuria notkistinannostuksia
- käytetään kutistumaa vähentäviä lisäaineita.

Ympäristöolosuhteet ja jälkihoito vaikuttavat kuivumiskutistuman nopeuteen. Ohut betonikerros kuivuu ja kutistuu nopeammin kuin paksumpi. Kutistuman loppuarvo on myös sitä suurempi mitä ohuempi on betonikerros. Yleensä suomalaisista sementeistä valmistettujen betonien kuivumiskutistuman arvot ovat välillä 0,4 – 0,8 %.

Notkistimia käytettäessä vedenvähennykseen on varmistuttava siitä, että kyseistä notkistinta käytettäessä kutistuma todella pienenee. Tämä on syytä varmistaa ennakolta tehtävin mittauksin.

Muodonmuutosominaisuuksista pieni kimmomoduuli on toivottava estettyjen muodonmuutosten aiheuttamien jännitysten pienentämisen kannalta. Yleisesti päälle- ja korjausvaluja koskevat tutkimukset ja ohjeet suosittelivat, että päällevallettavan betoninkerroksen kimmomoduulin tulisi olla samaa suuruusluokkaa kuin alustan.

Kimmomoduulin suuruuteen vaikuttavat

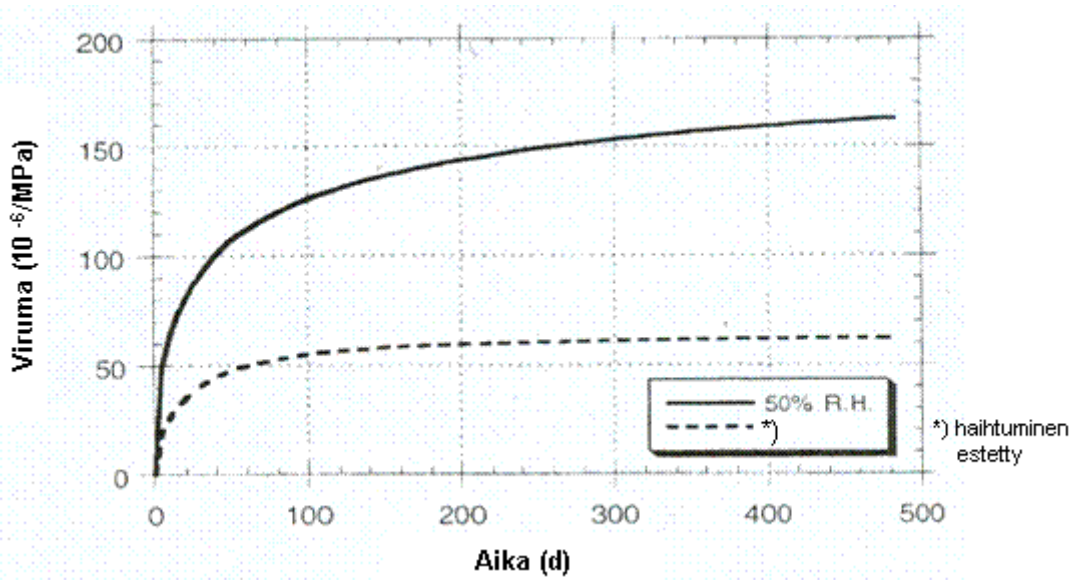
- Kiviaineksen määrä. Kiviaineksen määrän kasvaessa kasvaa kimmomoduuli.
- Pastan määrä. Pastan määrän kasvaessa pienenee kimmomoduuli. Pastan osalta määräävä tekijä on huokoisuus.
- Transitiovyöhykkeen mikrohalkeilu ja huokoisuus.

Kimmomoduulin suuruus riippuu pääasiassa betonin lujuudesta. Mitä suurempi on betonin lujuus, sitä suurempi on kimmomoduuli.

Koska meillä kiviaineksen kimmomoduuli vaihtelee vähän, käytännössä ainoa mahdollisuus pienentää kimmomoduulia on pastan määrän kasvattaminen. Pastan määrän kasvattaminen suurentaa kuitenkin kuivumisesta johtuvaa kutistumaa, joten kimmomoduulin pienentäminen ei välttämättä johda jännitysten pienemiseen.

Betonin murtovenymä lyhytaikaisessa kuormituksessa on pieni, normaalibetonilla suuruusluokkaa 0,05 - 0,2 %. Muodonmuutoksen (kutistuman) tapahtuessa hitaasti, murtovenymän suuruus kasvaa merkittävästi viruman ja mikrohalkeilun vaikutuksesta. Voidaankin todeta, että päällevalujen halkeilemattomuuden kannalta betonin vetoviruman vaikutus vetojännitysten pienemiseen on ratkaiseva.

Viruman suuruuteen vaikuttavat betonin koostumuksen osalta sideaine, pastamäärä ja kuidut. Kuormituksen suuruuden ja kuormitusiän ohella säilytysolosuhteet vaikuttavat merkittävästi viruman suuruuteen. Kuvassa 2 on esitetty eräs koetulos säilytysolosuhteiden (jälkihoidon) vaikutuksesta vetoviruman suuruuteen. Vetoviruman suuruus on huomattavasti suurempi betonin samalla kuivuessa.



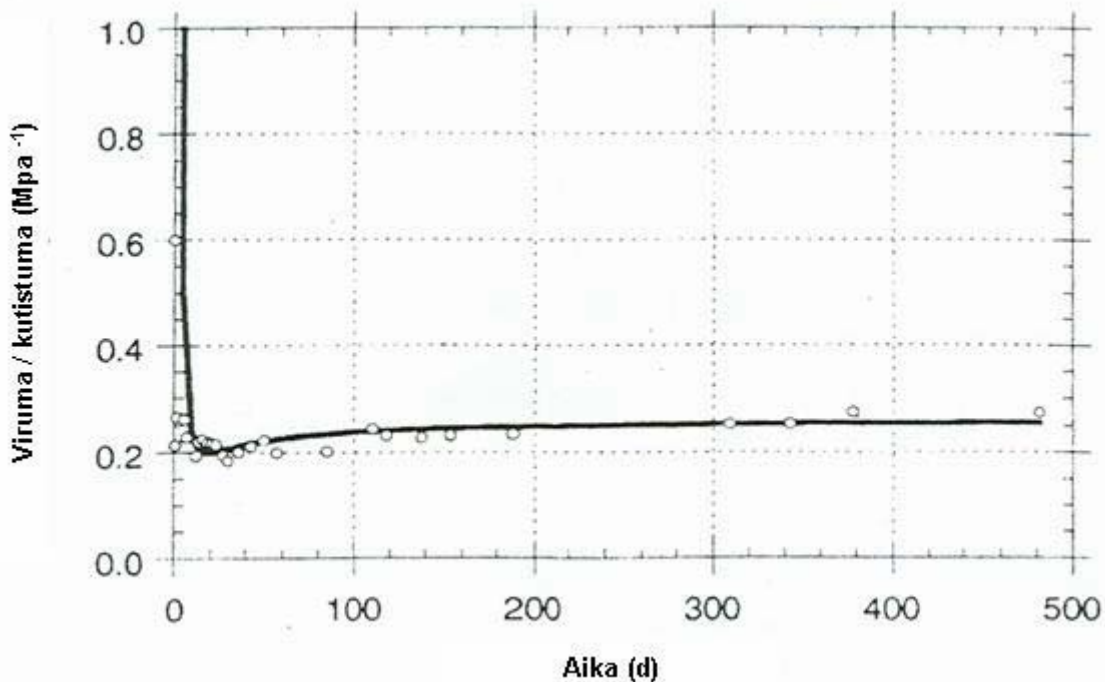
Kuva 2. Säilytysolosuhteiden vaikutus vetoviruman suuruuteen. Säilytysolosuhteet RH 50% (kuvassa ehjä viiva) ja kosteuden haihtuminen täysin estetty (kuvassa katkoviiva). Ennen kuormitusta 7 vrk:n kostea-jälkihoito /19/.

Lähteen /19/ mukaan normaalibetonin murtovenymä saavuttaa hitaassa kuormituksessa helposti arvon 0,6 %. Mainitussa lähteessä on esitetty seuraava yhteenveto suoritettujen vetovirumakokeiden tuloksista:

- Viruman suuruus riippuu betonin koostumuksesta ja virumakokeessa muodonmuutoksen suhde hetkelliseen kimmoiseen muodonmuutokseen vaihtelee välillä 1..7.
- Viruma vedossa on huomattavasti suurempi betonin samalla kuivuessa (kokeessa RH 50 %).

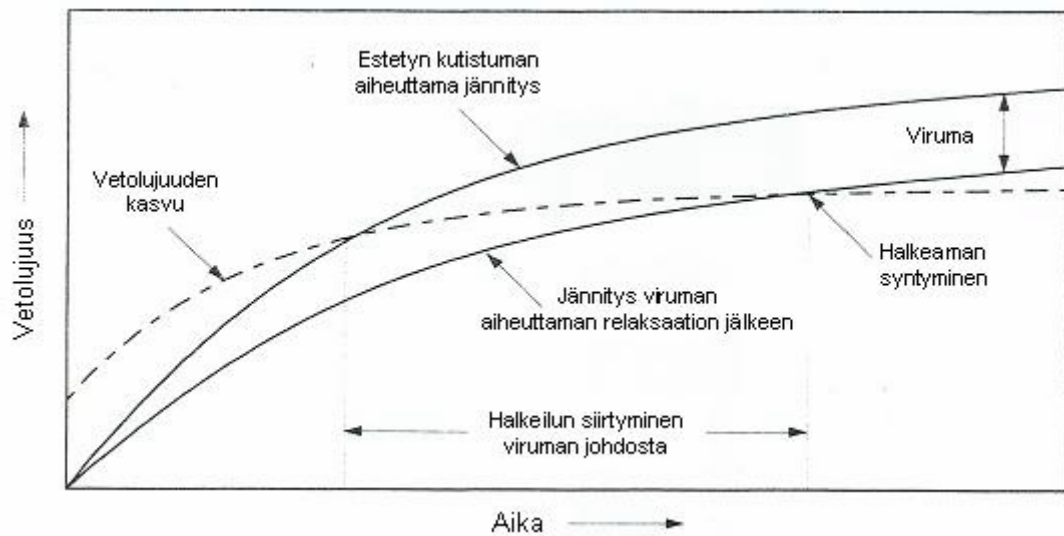
- Yli viikon vanhalla betonilla vetoviruman ja kuivumiskutistuman suhde on lähes vakio betonin samalla kuivuessa ja kutistuessa (RH 50 %, vetojännitys \leq murtolujuus) (kuva 3).
- Vetoviruman suuruus pienenee betonin lujuuden kasvaessa.
- Vetoviruma ja kutistuma riippuvat pastan määrästä, ei ainoastaan pastan ominaisuuksista. Kokeissa vetoviruma kasvoi pastan määrän pienentyessä.
- Silikalla on suhteellisen pieni vaikutus vetovirumaan (ja myös kutistumaan).
- Suuren ominaispinta-alan omaavat kuidut lisäävät vetovirumaa huomattavasti.
- Betonin vetomurtokriteeri ei ole murtovenymä.

Lähteen /1/ mukaan voidaan karkeasti olettaa, että murtovenymä on hitaassa kuormituksessa noin kolme kertaa suurempi kuin lyhytaikaisessa kuormituksessa.



Kuva 3. Vetoviruman suhde kuivumiskutistumaan. Vetoviruman ja kuivumiskutistuman suhde on lähes vakio yli viikon vanhalla betonilla betonin samalla kuivuessa (RH 50 %, vetojännitys \leq murtolujuus) /19/.

Viruman merkitystä päällevaluisissa halkeilua estävänä tekijänä korostetaan myös lähteessä /7/. Nuorelle betonille on mitattu huomattavasti suurempia viruman arvoja kuin kovettuneelle betonille. Lisäksi betonin lujuus vaikuttaa viruman suuruuteen. Nuoren betonin viruma pienentää huomattavasti samanaikaisesti kutistuvaan päällevaluun syntyviä vetojännityksiä ja viruman suuruuden vaihtelut selittävät osaksi sen, miksi joissakin tapauksissa päällevaluun ei synny näkyviä halkeamia ja joissakin tapauksissa syntyy.



Kuva 4. Vetojännitysten kehittyminen ja viruman vaikutus jännityksiin kuivumiskutistuman ollessa estetty /7/.

Jotta viruman ja relaksaation jännityksiä ja halkeilua pienentävä vaikutus olisi mahdollisimman suuri, on valun jälkeisten muodonmuutosten tapahduttava rauhallisesti ja hitaasti. Tämän johdosta valun jälkeisten olosuhteiden hallitseminen on tärkeää.

Betonin lämpötilakertoimen suuruus riippuu betonin koostumuksesta ja osa-aineiden lämpötilakertoimista. Tuoreen ja kovettumisen alkuvaiheessa olevan betonin lämpötilakerroin on jonkin verran suurempi kuin kovettuneen betonin. Tämä johtuu pääasiassa veden lämpötilakertoimen suuresta lämpötilariippuvuudesta. Taulukossa 1 on esitetty eri-ikäisten betonien keskimääräisiä lämpötilakertoimia /15/.

Taulukko 1. Eri-ikäisten betonien keskimääräisiä lämpötilakertoimia /15/.

Betonin ikä	Lämpötilakerroin $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Tuorebetoni	19
8 - 24 tuntia	15
2 - 7 vuorokautta	12

Kovettuneen betonin lämpötilakerroin on noin $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Suuremmasta lämpötilakertoimesta johtuen kasvavat varhaisvaiheessa (sitoutumisen ja lujuudenkehityksen alkuvaiheessa) lämpötilanmuutoksista aiheutuvat muodonmuutokset jonkin verran.

Kuidut estävät halkeamien syntymistä varhaisvaiheessa. Muotoiluvalujen betonikoostumuksissa on käytetty yleisesti muovi- tai teräskuituja. Myöhemmin syntyviin halkeamiin muovikuitujen vaikutus on olematon, teräskuidut sitä vastoin rajoittavat halkeamien leveyksiä tehokkaasti.

Kuten edellä todettiin, vaikuttavat kuidut myös virumaan. Suuren ominaispinta-alan omaavat kuidut lisäävät vetovirumaa huomattavasti /19/.

4.3 Sääolosuhteet valun aikana

Sääolosuhteilla on merkittävä vaikutus muotoiluvalun onnistumiseen ja laatuun. Vaikuttavia tekijöitä ovat ulkolämpötila ja sen muutokset, ilman suhteellinen kosteus ja tuulen nopeus.

Ulkolämpötilan muutokset vaikuttavat valun pintaan syntyviin jännityksiin betonin sitoutumis- ja kovettumisnopeuteen. Lämpötilan laskiessa pintaan syntyy vetojännityksiä. Ilman suhteellinen kosteus ja tuulen nopeus vaikuttavat kosteuden haihtumiseen betonipinnasta, millä on keskeinen vaikutus plastisessa tilassa mahdollisesti syntyviin jännityksiin ja halkeiluun.

Ulkolämpötila ja sen muutokset vaikuttavat alustan lämpötilaan ja valetun betonimassan lämpötilaan. Muotoiluvaluja tehdään tavallisesti kesäaikaan. Tällöin vuorokautiset ulkolämpötilan vaihtelut voivat olla huomattavan suuria, jopa 10 – 15°C. Korkeimmat lämpötilat kesäaikaan ovat yleensä iltapäivällä noin klo 14-15. Tämän jälkeen lämpötila alkaa laskea ja on alimmillaan seuraavana aamuna noin klo 4-6.

Alustan lämpötila seuraa ulkolämpötilaa. Jos ulkolämpötila on alhainen, on myös alustan lämpötila alhainen. Tällöin ohut valukerros jäähtyy muutamassa tunnissa lähelle ulkolämpötilaa ja myöhemmin sen lämpötila seuraa ulkolämpötilaa pienellä viiveellä. Alhaisen ulkolämpötilan seurauksena

- betoni on pitkään plastisessa tilassa, jolloin kosteuden haihtumiselle jää enemmän aikaa ja plastisessa tilassa tapahtuvan kutistumishalkeilun riski kasvaa
- pinnan hierto ja viimeistely siirtyy
- sitoutumisen ja lujuudenkehityksen alku siirtyy sekä lujuudenkehitys on sen alettua hidasta.

Vuorokautiset lämpötilanmuutokset voivat aiheuttaa myös huomattavia jännityksiä ohueen muotoiluvaluun. Sitoutumisen ja lujuudenkehityksen alkuvaiheessa betonin vetolujuuden ollessa pieni, lisäävät lämpötilan laskun aiheuttamat vetojännitykset plastisessa tilassa ja lujuudenkehityksen alussa tapahtuvaa kutistumista ja halkeiluriskiä. Nopea ja suuri lämpötilan lasku voi yksinään aiheuttaa halkeilua.

Valuajankohta ja lämpötilan muutokset ensimmäisen vuorokauden aikana vaikuttavat siihen, milloin muotoiluvalun yläpintaan syntyy valun jälkeen ensimmäisen kerran vetojännityksiä. Jotta vetojännitysten syntyminen yläpintaan saadaan siirrettyä mahdollisimman myöhään, olisi valu suoritettava aikaisin aamulla ulkolämpötilan ollessa alhainen. Tällöin sitoutumisen ja lujuudenkehityksen alkaessa ulkolämpötila nousee, jolloin valun pintaosat ovat puristettuja. Jos valu tapahtuu keskipäivällä tai myöhemmin, jolloin sitoutumisen sekä lujuudenkehityksen alkaessa ulkolämpötila laskee, syntyy yläpintaan vetorasituksia.

Haihtuvan kosteuden määrä vaikuttaa plastisessa tilassa tapahtuvaan kutistumiseen ja halkeiluun. Sääolosuhteiden osalta kosteuden haihtumiseen vaikuttavat

- ilman suhteellinen kosteus
- tuulen nopeus ja
- betonipinnan ja ulkolämpötilan välinen ero.

Plastisen kutistumishalkeilun estämisen kannalta jälkihoidon merkitys on tärkeä, vaikka muotoiluvaluissa käytetyt betonikoostumukset eivät ole yleensä tavanomaista "herkempiä" plastiselle kutistuman aiheuttamalle halkeilulle. Jos valun paksuus on pieni, on sen kosteuden haihtumiskapasiteetti myös pieni, mikä suurentaa halkeamariskiä.

4.4 Betonityön suoritus

Betonityön suoritukseen kuuluu

- tiivistys ja pinnan tasaus
- jälkihoito
- mahdollinen saumojen sahaus.

Ennen betonointia on varmistettava alustan puhtaudesta. Mikäli tartuntalaastia käytetään on seurattava, että se ei pääse kuivamaan ennen massan levitystä.

Hyvän tartunnan edellytyksenä on saumakohtan hyvä tiivistys. Valun paksuuden ollessa ohut, tiivistys tehdään usein laudalla pinnan tasauksen yhteydessä. Saumakohtan tiiviiksi saaminen edellyttää tällöin notkeaa massaa ja tartuntalaastin käyttöä. Valualueen ollessa iso ja paksumpi, pinnan tasaus ja tiivistäminen suoritetaan tärypalkilla. Valun paksuuden ollessa 100 – 150 mm, riittää kaksoistärypalkin teho tiivistämään jäykänkin betonin tiiviiksi. Sauvatärytystä ennen tärypalkilla ajoa suositellaan yleisesti betonikerroksen paksuuden ollessa yli 100 mm. Sauvatärytystä suositellaan käytettäväksi myös ohuempien betonikerrosten tiivistämiseen reuna-alueilla, joissa tärypalkin tiivistysteho on rajoitettu /1/.

Varhaisjälkihoito on tehtävä heti pinnan tasauksen jälkeen. Varhaisjälkihoidon tarkoituksena on estää pinnan kuivuminen (meneminen korpuksi) ennen hierontaa. Kosteuden haihtumisen ollessa sääolosuhteista johtuen suuri, voi varhaisjälkihoidon laiminlyönti aiheuttaa pintaan halkeilua ja pinnan kuivuminen vaikeuttaa myöhemmin tehtävää hierontaa. Kuivuneen pinnan hierto voi aiheuttaa pintaan viiltomaisia halkeamia ja irrottaa ohuen valukerroksen alustastaan. Kuivuneen pinnan hierron helpottamiseksi vettä ruiskutetaan usein pintaan mikä voi aiheuttaa myöhemmin verkkohalkeilua pinnan kuivuessa.

Pinnan hierron tekeminen "oikeana ajankohtana" on hierron suorituksen ja pinnan laadun kannalta tärkeää. Liian aikaisin tehty hierto voi aiheuttaa pintaan verkkohalkeilua, jonka syynä on hierron yhteydessä pintaan erottuva vesi sekä pintakerroksen sementti- ja hienoainesmäärän kasvu.

Varsinainen jälkihoito aloitetaan pinnan hierron ja viimeistelyn jälkeen. Sääolosuhteiden ohella jälkihoidon laatu vaikuttaa merkittävästi siihen syntykö halkeilua. Jälkihoitoaineita käytettäessä on muistettava että ne läpäisevät kosteutta ja kosteuden läpäisyn määrä riippuu jälkihoitoaineen käyttömäärästä. Tämän johdosta jälkihoitoaineen käyttömäärän on oltava riittävän suuri erityisesti jos haihtuminen on suurta.

Saumojen avulla voidaan pienentää estetystä kutistumasta aiheutuvia pakkorasituksia ja halkeamariskiä. Saumojen vaikutus riippuu muodonmuutoksen esteen asteesta ja päällevalun mittasuhteista. Muotoiluvalun paksuuden ollessa pieni ja alustan lähes "täysin jäykkä", saumoja on kuitenkin oltava erittäin tiheässä, jotta niiden avulla voidaan halkeilu estää tehokkaasti.

Juvan sillan muotoiluvalussa halkeamien syntyminen estettiin osittain sahaamalla valuun 4 – 5 m välein 10 – 15 mm syvät poikittaissaumat, jotka täytettiin epoksilla ennen eristystä /18/.

4.5 Liikenteen aiheuttamien värähtelyjen vaikutus

4.5.1 Värähtelyjen vaikutukset siltaan ja betoniin

Korjaustöiden ajaksi liikenteen katkaisu sillalla on tavallisesti mahdotonta. Korjaustöitä joudutaan suorittamaan liikenteen aiheuttamasta tärinästä huolimatta. Syynä huonoon tartuntaan korjauskohteissa on

pidetty joskus liikenteen aiheuttamia värähtelyjä sitoutumis- ja/tai kovettumisvaiheen alussa /17/. Halkeilun syynä värähtelyjä on pidetty harvemmin.

Värähtelyn laatu ja suuruus voivat vaihdella merkittävästi aiheuttajasta riippuen. Arvioitaessa värähtelyn vaikutusta rakenteisiin käytetään yleisesti mittayksikkönä heilahdusnopeutta (mm/s).

Silfwerbrand on todennut Ruotsissa silloilla suoritettujen mittausten perusteella, että sillat värähtelevät taajuuksilla, jotka riippuvat lähes yksinomaan sillan dynaamisista ominaisuuksista. Liikenteen aiheuttamilla kuormituksilla ei näytä olevan vaikutusta värähtelyominaisuuksiin. Mittausten mukaan heilahdusnopeudet silloilla ovat korkeintaan noin 30 – 35 mm/s /20/.

Sveitsissä on todettu, että käytännössä maantiesillat voidaan värähtelyjen taajuuden perusteella jakaa kolmeen ryhmään, normaalitaajuuksiin, $f = 2 - 5$ Hz, keskitaajuuksiin, $f = 5 - 10$ Hz ja korkeataajuuksiin, $f = 10 - 15$ Hz. Amplitudi on suuruudeltaan 0,3 – 0,4 mm ja suurin arvo ylittää harvoin 1,0 mm /14/.

Englannissa tehdyssä tutkimuksessa on todettu, että värähtelyrasitus kasvaa ajoneuvon nopeuden kasvaessa välillä 18 – 48 km/h. Suuremmilla nopeuksilla ei nopeuden kasvulla ole vaikutusta. Ajoneuvon nopeuden vaikutus sillan värähtelyyn on yleensä pieni. Suurempi vaikutus on raskaiden ajoneuvojen jarrutuksilla ja kiihdytyksillä /13/.

Värähtelevä alusta lisää päällevalun omasta painosta aiheutuvia hitausvoimia. Hitaisvoimat voivat irrottaa korjauskerroksen tai aiheuttaa korjausaineeseen harventumia ja rakkuloita /14/.

Värähtelyn vaikutus betoniin riippuu pääasiassa lujuudenkehityksen vaiheesta ja betonin notkeudesta. Tuoreessa betonissa värähtely aiheuttaa jälkitiivistymistä ja tiheyden kasvua. Tämän seurauksena betonin lujuus kasvaa. Sitoutumisen ja kovettumisen alkuvaihe on betonin myöhempien ominaisuuksien kannalta kriittisin. Sitoutumisen alkaessa murtovenymä on pieni ja lujuus on olematon. Jos tällöin värähtelyn aiheuttamat rasitukset ylittävät betonin senhetkisen muodonmuutoskyvyn ja lujuuden, seurauksena voi olla tartunnan huononemista ja mikrohalkeilua, joka alentaa betonin lujuutta ja tiiveyttä.

Kriittinen vaihe on ohitettu, kun lujuudenkehitys on edennyt niin pitkälle, että betonin lujuus on tarpeeksi suuri kestämään värähtelyn aiheuttamat rasitukset vaurioitumatta.

Notkeudella on todettu vaikuttavan sitoutumisen ja kovettumisen alkuvaiheessa olevan betonin vaurioitumiseen värähtelyn vaikutuksen alla. Painuman ollessa suuruusluokkaa 100 mm, ei betonin puristuslujuuden eikä tartunnan raudoitukseen ole todettu alentuneen. Painuman arvolla 190 mm mainitut arvot ovat alentuneet 5 - 10 %. Syynä on ollut betonin erottuminen /1/.

4.5.2 Värähtelyä koskevia rajoja ja suosituksia

Betonitoissa käytettäviä värähtelyrajoja ja -suosituksia on yleisimmin käytetty louhintatöiden yhteydessä. Koska työn suorituksen kannalta luotettavia kriteerejä ja raja-arvoja ei ole toistaiseksi olemassa, ovat työselityksissä ja ohjeissa annetut rajat yleensä erittäin konservatiivisia, jos niitä on ollenkaan annettu.

Suomessa on tärinän suhteen annettu rajoituksia vain louhintatöiden yhteydessä. Esimerkiksi sillanrakennus- ja korjauskohteissa olevat nopeusrajoitukset perustuvat henkilöturvallisuuteen, eivät teknisiin vaatimuksiin. Ruotsin siltanormien osissa *Sillan ylläpito* (Brounderhåll 2000 /5/) ja *Sillan parannus* (Bro 2004, Förbättring /6/) on annettu sillan korjaus- ja parannustöissä värähtelyjä koskevia rajoja ja ohjeita.

VTT:n suositamissa värähtelyrajoissa on betonin lujuudenkehitys jaettu neljään vaiheeseen, työstettävyyssäikä (aika valusta tärytysrajaan), kovettumisen ensimmäinen vaihe (aika tärytysrajasta 5 MPa:n lujuuteen), jälkikovettumisvaihe (lujuus 5 MPa - nimellislujuus) ja täysin kovettunut betoni. Työstettävyyssäivaiheessa sallittu heilahdusnopeus on korkeintaan 50 mm/s, kovettumisen ensimmäisessä vaiheessa 5 mm/s, jälkikovettumisvaiheessa 30 – 50 mm/s riippuen rakenteen massiivisuudesta (seinät ja pitkät perusmuurit 30 mm/s, muut rakenteet 50 mm/s) ja kovettuneella rakenteella 50 – 120 mm/s rakenteen hoikkeudesta riippuen (helposti halkeavat levymäiset rakenteet 50 mm/s, muodonmuutoksia hyvin kestävät rakenteet 70 – 120 mm/s).

Louhintatöiden yhteydessä Suomessa on sovellettu ulkomailla käytössä olevia värähtelykestävyyden raja-arvoja. Esimerkiksi Helsingin metron ja Olkiluodon ydinvoimalan louhintatöissä raja-arvoja on sovellettu siten, että betonille, jonka puristuslujuusvaatimus on 40 MN/m², on alle 70 tunnin iässä sallittu heilahdusnopeuden arvo 10 mm/s ja 70 tunnista viikon vanhalle betonille 35 mm/s.

Hulshizerin ja Desain /9/ esittämät louhintatöiden yhteydessä käytettäviksi tarkoitettujen heilahdusnopeuden raja-arvot perustuvat lukuisiin sylintereillä ja palkeilla tehtyihin koetuloksiin. Betonin iästä riippuvat raja-arvot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Hulshizerin ja Desain esittämät louhintatöiden yhteydessä käytettäviksi tarkoitettujen heilahdusnopeuden raja-arvot /9/.

Betonin ikä h	Suurin heilahdusnopeus mm/s
0 – 3	100
3 – 11	38
11 – 24	50
24 – 48	100
> 24	175

Ruiskubetonitöissä sallitun heilahdusnopeuden raja-arvoina on Suomessa yleisesti käytetty 0 – 3 vrk:n ikäiselle betonille 10 mm/s ja 3 – 7 vrk:n ikäiselle betonille 35 mm/s.

Useiden tutkimusten mukaan värähtelyillä (heilahdusnopeuksilla 20 – 25 mm/s), joita esiintyy sillan korjaustöiden yhteydessä, ei ole mitään haitallista vaikutusta betonin ominaisuuksiin eikä raudoituksen ja päällevalujen tartuntaan. Kriittinen vaihe kestää 3:sta noin 14 tuntiin riippuen betonin koostumuksesta ja kovettumislämpötilasta /1/.

Silfwerbrandin /14/ useista tutkimuksista tekemän yhteenvedon mukaan liikenteen aiheuttamalla värähtelyllä ei näytä olevan haitallisia vaikutuksia betoniin sillan korjaustyön yhteydessä liikenteen kulkiessa viereisellä ajoradalla. Kriittinen ajanjakso alkaa noin neljä tuntia valusta ja on suhteellisen lyhyt. Kuitenkaan suuren painuman omaavia betoneja ei tule käyttää korjaustöissä.

Ruotsin tielaitoksen siltanormien sillan korjauksia koskevassa osassa *Sillan ylläpito 2002* (Brounderhåll 2002 /5/) on annettu seuraavat liikenteen aiheuttamaa värähtelyä koskevat ohjeet ja määräykset:

- Tuore- ja kovettava betoni on suojeltava värähtelyiltä.

- Betonointihetkestä (betoni ympäröi raudoituksen) ajankohtaan jolloin betonin lujuus saavuttaa 12 Mpa, ei rakenteen värähtelynopeus saa ylittää arvoa 5 mm/s.
- Päällysteen epätasaisuudet valupaikalla on korjattava liikenteen aiheuttamien värähtelyjen minimoimiseksi.
- Bruttopainoltaan enintään 4 tn painavat ajoneuvot saavat kulkea sillalla. Painavimmat ajoneuvot saavat kulkea valvottuna ja niiden nopeus saa olla korkeintaan 15 km/h.

Ruotsin tielaitoksen siltanormien sillan parantamista koskevassa osassa *Silta 2004, Parantaminen* (Bro 2004, Förbättring /6/) on esitetty seuraavat liikenteen aiheuttamaa värähtelyä koskevat ohjeet ja määräykset:

- Tuore- ja kovettuva betoni on suojeltava värähtelyiltä.
- Betonointihetkestä (betoni ympäröi raudoituksen) ajankohtaan jolloin betonin lujuus saavuttaa 12 Mpa, ei rakenteen värähtelynopeus saa ylittää arvoa 30 mm/s.
- Liikenteen aiheuttamat rakenteen värähtelynopeudet edellytetään selvitettäväksi valupaikalla ennen valua, jotta tarvittavia toimenpiteitä värähtelyjen pienentämiseksi voidaan kokeilla ja suorittaa.
- Jos värähtelynopeuksia ei selvitetä, rajoitetaan raskaiden ajoneuvojen kulkemista. Bruttopainoltaan yli 12 tn painavat ajoneuvot saavat liikkua sillalla valvottuna ja niiden nopeus saa olla korkeintaan 15 km/h.

4.5.3 Liikenteen aiheuttaman värähtelyn mittaus korjauskohteessa

Liikenteen aiheuttamien värähtelyjen suuruusluokan selvittämiseksi suoritettiin korjaustyön aikana kehä III:lla sijaitsevalla pääradan ylittävällä Puistolän sillalla värähtelymittauksia. Mittaus suoritettiin sillan kannen toisen puolen muotoiluvalun aikana. Mittauksen aikana liikenne kulki viereisellä ajoradalla. Liikenteen nopeus oli rajoitettu 30 km/h, mutta todellisuudessa nopeusrajoitusta noudattivat vain harvat ajoneuvot.

Mittauspaikka sijaitsi sillan itäpäässä, jossa havaintojen perusteella todettiin värähtelyn olevan suurinta. Värähtelyjen syynä olivat ennen siltaa ajoradan päällysteessä olevat epätasaisuudet, koholla oleva liikuntasäama ja välittömästi liikuntasäaman jälkeen sillan ajoradan päällysteessä olevat epätasaisuudet, jotka aiheuttivat selvästi aistittavaa värähtelyä siltaan raskaiden ajoneuvojen kulkiessa.

Mittauksen suorittamista varten asennettiin valettavan alueen viereen kiihtyvyyssanturit. Kaksi antureista sijaitsi asfaltin pinnassa ajoradan vieressä ja toiset kaksi valettavan alueen vastakkaisella puolella reunapalkin pinnassa. Kaksi antureista sijaitsi 6,5 m etäisyydellä ja toiset kaksi 21,9 m etäisyydellä sillan idän puoleisen pään liikuntasäumasta.

Mittausnäytteet otettiin raskaan ajoneuvon tai usean raskaan ajoneuvon tullessa sillalle. Yhden mittausten kesto vaihteli välillä 60 - 360 s. Viimeinen mittaus tehtiin kun sillan ylitti ainoastaan valuu betonია toimittava betoniauto, jossa oli 4 m³ betonia. Auton nopeus oli alle nopeusrajoituksen. Muu liikenne oli tällöin siirretty kokonaan vieressä sijaitsevalle sillalle.

Yleensä raskaan ajoneuvon ylittäessä värähtely oli aistittavissa, sitä vastoin kevyiden ajoneuvojen ylittäessä sillan värähtelyä ei aistittu.

Taulukossa 3 on esitetty eri mittauksissa todetut värähtelynopeuden suurimmat arvot.

Taulukko 3. Nopeuden suurimmat arvot eri mittauksissa.

Anturi	Mittaus						
	1 mm/s	2 mm/s	3 mm/s	4 mm/s	5 mm/s	6 mm/s	7 mm/s
1	6,06	21,47	7,52	12,80	4,48	15,70	1,66
2	5,53	20,87	9,24	11,07	4,36	16,51	1,88
3	3,81	8,68	4,22	4,21	2,59	6,20	1,06
4	4,91	13,35	4,36	7,24	2,27	5,14	1,05

Tulosten perusteella värähtelyn nopeuden suurimmat arvot olivat aina lähempänä sillan päätä olevissa antureissa (anturit 1 ja 2). Suurimman nopeuden ero keskellä siltaa sijaitseviin antureiden tuloksiin oli huomattava, suurimmillaan selvästi yli kaksinkertainen (mittaus 6).

Pienimmät nopeuden arvot saatiin viimeisessä mittauksessa (mittaus 7), jossa sillan ylitti ainoastaan valuuun betonia toimittava betoniauto (betonia noin 9,6 tn ja auton oma paino noin 10,7 tn). Tulos osoittaa, että myös raskaan ajoneuvon aiheuttama värähtely sillalla jää pieneksi, jos ajoneuvon nopeus on pieni.

Mittauksen tuloksissa voidaan tehdä seuraavat karkeat johtopäätökset:

- Merkittävin värähtelyjen syy on sillan ajoradan pinnassa olevat epätasaisuudet, lähinnä liikunta- saumojen kohdat ja huomattavat epätasaisuudet (kuopat ym.) päällysteessä. Tällöin raskaan liikenteen aiheuttamat värähtelyn nopeuden huippuarvot ylittävät Ruotsin siltanormeissa korjaustöitä koskevassa osassa annetun vaatimuksen 5 mm/s selvästi.
- Jos ajorata on tasainen, on raskaan liikenteen aiheuttama värähtely pientä. Myös epätasaisella ajoradalla raskaan ajoneuvon aiheuttama värähtely näyttää jäävän pieneksi, jos ajoneuvon nopeus on pieni.
- Henkilöautojen aiheuttama värähtely on pientä eikä aiheuta ongelmia, vaikka ajoradassa on huomattavia epätasaisuuksia.
- Jos tärinän vaikutusta halutaan pienentää, suuret epätasaisuudet ajoradan pinnassa on tasoitettava ennen muotoiluvaihetta.

5 RUOTSISSA TEHTYJEN SILTOJEN KORJAUSVALUJEN TARTUNTAA KOSKEVIEN TUTKIMUSTEN TULOKSIA

Ruotsissa korjattiin 1980 puolivälissä yli 250 betonisillan kansilaatta /22/. Korjauksissa vanha huonokuntoinen betoni poistettiin vesipiikkauksella ja pintaan valettiin uusi betonikerros. Korjauksen jälkeen yli 20:llä sillalla tehtiin lukuisa määrä korjausvalun tartuntakokeita. Tulosten mukaan keskimääräinen tartuntalujuus oli yli 1,5 MPa. Todellinen tartuntalujuus oli kuitenkin suurempi, sillä ainoastaan pieni osa koekappaleista murtui valun rajapinnasta, suurin osa murtui alustan betonista. Joissakin tapauksissa alustan betoni oli pahoin vaurioitunut ja sen lujuus oli huono.

Kun murtuminen tartuntakokeessa tapahtui rajapinnassa, merkittävimmit syiksi todettiin alustan huono puhdistus ja pintavalun riittämätön tiivistys. Kun urakoitsijat tiedostivat alustan huolellisen puhdistamisen ja pintavalun hyvän tiivistämisen merkityksen, tulokset tartuntalujuuden osalta paranivat ja rajapinnasta tapahtuneiden murtumien määrä väheni.

Kymmenen vuoden kuluttua korjauksista tutkittiin seitsemän aikaisemmin tutkitun sillan korjauksen kunto. Tartuntaan vaikuttivat tällöin lisäksi 10 vuoden aikainen liikenne ja säärasitus. Vaikuttavia teki-

jöitä olivat raskaan liikenteen määrä, sillan jäykkyys, suolarasitus sekä jäätymis- ja sulamissyklien lukumäärä. Valituilla silloilla vaihtelivat liikennemäärät, rakennesysteemi, sijaintipaikan ilmasto ja suolauksen määrä. Tartuntakokeita tehtiin sekä positiivisen momentin (korjausvalu puristettu) että negatiivisen momentin (korjausvalu vedetty) alueilla. Yhteenvedo tuloksista on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Tartuntalujuus korjaustyön jälkeen ja kymmenen vuoden kuluttua korjauksesta /21/.

Silta	Kokeiden määrä		Tartuntalujuus (Mpa)		Tartuntalujuuden kasvu %
	Korjauksen jälkeen	Vuonna 1995	Korjauksen jälkeen	Vuonna 1995	
Bjurholm	9	8	1,96	1,99	2
Mälsund	6	8	1,71	2,17	27
Skellefteå	3	9	1,43	1,82	27
Södertälje	?	7	> 1,5	2,05	~ 35
Umeå	4	9	1,56	1,61	3
Vrena	8	9	1,49	1,56	5
Överboda	12	9	2,09	2,18	3

Kaikissa tutkituissa silloissa tartuntalujuudet olivat hiukan kasvaneet verrattuna korjaustyön jälkeen tehtyihin tuloksiin. Liikenteen aiheuttama rasitus, suolaus sekä toistuva sulaminen ja jäätyminen eivät olleet huonontaneet tartuntaa. Myöskään pitkäaikainen korjausvaluun vaikuttava vetojännitys ei heikentänyt tartuntaa.

Johtopäätös tutkimuksista oli että hyvä ja kestävä tartunta saadaan, kun kaikki työvaiheet käsittäen vanhan betonin poiston, alustan puhdistuksen, betonin valun ja tiivistyksen sekä jälkihoidon, tehdään asianmukaisesti ja huolellisesti.

6 LAATUVAATIMUKSET JA NIIDEN SAAVUTTAMINEN

6.1 Muotoiluvalun laatuvaatimukset

Vaatimuksia muotoiluvalulle on esitetty SYL 3:ssa, SYL 6:ssa ja *Vedeneristyksen alustan kunnostusta* koskevassa Silko-ohjeessa.

Muotoiluvalua koskevia vaatimuksia ovat:

- Valussa käytettävän betonin tavoitelujuus on K35 ja betonin on oltava pakkasenkestävää. Pakkasenkestävyysvaatimus on sama kansilaatalla.
- Muotoiluvalun on oltava kiinni alustassaan, tartuntalujuuden on oltava $\geq 1,5$ MPa.
- Halkeaman leveys ja halkeamien määrä on rajoitettu. Suurin sallittu halkeaman leveys on 0,2 mm. Suurimman sallitun halkeamaleveyden suuruisten ja tätä pienempien halkeamien yhteenlaskettu pituus yhden neliömetrin alueella saa olla enintään 0,5 m. Leveydeltään 0,1 mm ja pienempiä halkeamia ei oteta tarkastelussa huomioon.
- Yläpinnan vetolujuuden on oltava $\geq 1,5$ MPa.
- Yläpinnan on oltava riittävän tasainen. Tasaisuusvaatimus riippuu käytettävästä eristysmateriaalista ja vaatimukset on esitetty SYL 6:ssa.
- Kallistusten on oltavat suunnitellut (viettokaltevuus vähintään 2 %).
- Valun paksuuden on oltava vähintään 20 mm. Suurempi paksuus on toivottava.

Muotoiluvalun paksuutena 20 mm on erittäin pieni. Mikäli mahdollista suurempaa paksuutta tulee käyttää. Valun paksuuden ollessa pieni, betonityön yhteydessä tehdyt pienetkin virheet ja laiminlyönnit tulevat heti korostetusti esille yleensä ensin halkeiluna ja mahdollisesti myös valun irtoamisena alustastaan. Mitä suurempi on valun paksuus, sitä pienempi on työvirheiden vaikutus.

Muotoiluvalussa käytettävän betonin lujuus K35 on riittävä. Tämän lujuuden omaavalla betonilla saavutetaan tartuntalujuudelle 1,5 MPa vaatimus. Jos lujuusvaatimusta suurennetaan, halkeamien syntymisriski yleensä kasvaa. Halkeamien syntymisriskin pienentämiseksi myös huomattavaa betonin ylilujuutta tulee välttää.

Polymeerisementtibetonia (PCC) käytettäessä käyttömääräksi suositellaan enintään 5 – 10 %. Jos käyttömäärät ovat suurempia, halkeamien syntymisriski kasvaa.

Jos muotoiluvalussa on raudoitus, on raudoituksen tuentaa kiinnitettävä huomiota sen asennuksen yhteydessä. Raudoituksen sijainti pohjassa vaikeuttaa hyvän tartunnan saamista alustaan ja pyrkii käyristämään laattaa. Halkeamaleveyksien rajoittamisen kannalta pohjassa olevalla raudoituksella ei ole merkitystä.

Muotoiluvalussa käytettävän betonin kutistuman on oltava pieni. Tulevaisuudessa kutistumavaatimuksen asettamista on harkittava. Vaatimus voi olla sama kuin julkisivubetonissa eli 0,6 ‰ (mm/m). Toisaalta tiukkakaan vaatimus ei estä halkeilua, jos betonityön suoritusta ei tehdä huolella.

Halkeaman leveysvaatimuksen saavuttaminen edellyttää että halkeamien syntyminen varhaisvaiheessa estetään. Yleensä leveimmät halkeamat syntyvät varhaisvaiheessa ja halkeamien vierestä pintavalu irtoaa alustastaan. Jos halkeamien syntyminen saadaan estettyä varhaisvaiheessa eikä valu irtoa alustastaan, viruma estää kuivumisesta johtuvan kutistuman aiheuttaman halkeilun syntymistä ja syntyvät halkeamat ovat leveydeltään pieniä.

Edellä lueteltujen vaatimusten toteutuminen voidaan todeta yleisesti käytössä olevilla koemenetelmillä ja mittauksilla.

6.2 Vaatimusten saavuttaminen

Esitetyt vaatimusten saavuttaminen ei edellytä yleensä erityistoimenpiteitä. Suunnittelemalla työ huolellisesti, ottamalla työn suunnittelussa huomioon olosuhteet, tekemällä muotoiluvalua edeltävät työt sekä itse valu ja jälkihoito huolella, voidaan vaatimukset toteuttaa.

Olosuhteilla on merkittävä vaikutus muotoiluvalun onnistumiseen. Sateella alustaan voi syntyä vesilammikoita, jotka huonontavat tartuntaa. Kuivissa ja erityisesti tuulisissa olosuhteissa valun yläpinta kuivuu nopeasti, jolloin halkeamien ja valun irtoamisriski on suuri. Viileissä olosuhteissa sitoutuminen ja lujuudenkehitys on hidasta ja varhaishalkeilun riski on suuri.

Olosuhteiden huomioonottaminen betonityön suunnittelussa on keskeistä. Vaikeissa olosuhteissa vaatimusten täyttäminen edellyttää että valuhenkilöstöä on riittävästi, jälkihoito ja pinnan suojaus tehdään huolellisesti. Jos suunniteltuna valujankohtana odotettavissa olevat sääolosuhteet ovat huonot ja aika-tila mahdollistaa, valun siirtämistä kannattaa harkita. Olosuhteiden voittamiseksi sääsuojan käyttö on suositeltavaa.

Hyvä tartunta alustaan on muotoiluvalun tärkein vaatimus. Hyvä ja kestävä tartunta saadaan, jos työn suoritus johon kuuluu vanhan betonin poisto, pinnan puhdistus, betonin tiivistys ja jälkihoito tehdään asianmukaisesti ja huolellisesti.

Halkeamien syntymiseen estämisen kannalta muotoiluvalu on erittäin vaativa tehtävä. Halkeamille asetettujen rajojen saavuttaminen edellyttää ennen kaikkea hyvää työsuoritusta. Tällöin varhaisvaiheessa tapahtuvan halkeilun estäminen on tärkeää. Jälkihoidon suoritus on tässä avainasemassa. Kun halkeamien syntyminen varhaisvaiheessa estetään, myöhemmin kuivumisesta johtuvan kutistuman aiheuttamien jännityksiä viruma eliminoi tehokkaasti jolloin syntyvät halkeamat jakautuvat tasaisesti ja ovat leveydeltään pieniä. Pienissä halkeamissa halkeamien itsetiivistyminen on mahdollista.

Kuitujen käyttö betonissa halkeamien syntymisen estämiseksi ja halkeamaleveyksien rajoittamiseksi on suositeltavaa.

Värähtelyjen vaikutuksen osalta on epävarmuutta. Värähtelyjen vaikutusten pienentämiseksi liikunta- ja ajoradan vieressä ajoradan pinnassa ja sillan ajoradassa olevat suuremmat epätasaisuudet on syytä tasoittaa ennen muotoiluvalua. Huomattavaa värähtelyä aiheuttaa raskas liikenne, muun liikenteen aiheuttaman värähtelyn vaikutus on yleensä merkityksetön. Raskaan liikenteen osalta nopeuden rajoitus on välttämätöntä jos ajoradan pinta on epätasainen.

Vaatimuksista lujuuden ja pakkasenkestävyyden alitukset ovat vaikeimmin korjattavissa. Yleensä ne edellyttävät betonin poistamista ja korvaamista uudella. Myös muotoiluvalun irtoaminen alustastaan edellyttää, että irronneilla alueilla betoni poistetaan ja korvataan uudella betonilla. Muiden vaatimusten suhteen tapahtuvat alitukset ovat yleensä suhteellisen helposti korjattavissa.

7 PARANNUSEHDOTUKSIA

Muotoiluvalun laadun kannalta halkeilun hallitseminen on osoittautunut vaikeimmaksi. Halkeilun hallitsemisen kannalta suurimmat ongelmat muodostavat sääolosuhteet valun aikana ja betonin kutistuma. Hyvä ja kestävä tartunta saadaan jos kaikki työvaiheet tehdään asianmukaisesti ja huolellisesti.

Halkeilun hallitsemisen kannalta parannusehdotuksia ovat

- sääsuojien käyttö ulkoisten olosuhteiden hallitsemiseksi
- betonin kutistuman vaikutuksen pienentäminen.

Sääsuojien käyttö parantaa ulkoisten olosuhteiden hallintaa oleellisesti. Sääsuojien alla lämpötilaa voidaan säädellä tietyissä rajoissa ja tuulen vaikutus voidaan täysin eliminoida. Tällöin olosuhteet valun aikana ja sen jälkeen ovat paremmin hallinnassa, jolloin erityisesti vaikeiden sääolosuhteiden aiheuttamaa halkeiluriskiä voidaan oleellisesti pienentää. Sääsuoja on käytetty jonkin verran.

Betonin kutistumaa voidaan pienentää käyttämällä kutistumaa vähentäviä lisäaineita, paisuttavia lisäaineita ja sisäistä jälkihoitoa /12/. Sementin valinnalla ja modifioimalla sementtiä on kutistumaa myös voitu pienentää. Meillä sementin osalta valinnan mahdollisuudet ovat rajoitetut.

Kutistumaa vähentävien lisäaineiden toiminta perustuu niiden kykyyn alentaa veden pintajännitystä ja siten pienentää kuivumiskutistuman synnyttämiä voimia. Kutistumaa vähentävät lisäaineet eivät poista kutistumaa mutta vähentävät kuivumiskutistuman määrää 25 – 50 % /13/. Kutistumaa vähentävä lisäaine sekoitetaan betoniin kuten tavanomainen lisäaine.

Paisumista aiheuttavat lisäaineet aiheuttavat betonissa paisumista kompensoiden samalla betonin kutistumista. Paisumista aiheuttavien lisäaineiden toimintapa riippuu käytettävästä lisäaineesta ja sen annostuksesta /12/.

Sisäisessä jälkihoidossa betoniin sekoitetaan uusi ainesosa joka toimii kuten jälkihoitoaine. Sisäisessä jälkihoidossa voidaan erottaa kaksi erilaista tapaa, vettä lisäävä jälkihoito ja ei vettä lisäävä jälkihoito /12/. Vettä lisäävässä jälkihoidossa betoniin sekoitettava jälkihoitoaine toimii vesivarastona luovuttaen hitaasti vettä betonin kovettuessa. Vettä lisäävä jälkihoitoaine estää tehokkaasti autogeenista kutistumaa ja toimii hyvin pienen vesisementtisuhteen omaavassa betonissa.

Ei vettä lisäävässä jälkihoidossa betoniin lisätään sekoituksen yhteydessä vesiliukoista kemiallista ainetta. Tällainen kemiallinen aine pienentää veden haihtumista ulkoilmaan betonin kuivuessa.

Betoniteknisissä siltatutkimuksissa tehdään kuluvana vuonna kirjallisuustutkimus koskien betonimassaan valmistuksen yhteydessä lisättäviä jälkihoitoaineita.

Kanadassa tehdyssä tutkimuksessa käytettiin kuutta erilaista betonikoostumusta vanhan sillan yläpinnan korjausvalussa /8/. Kaksi betonikoostumuksesta oli itsetiivistyvää betonia, toisessa käytettiin paisuvaa sementtiä ja toisessa kutistumista vähentävää lisäainetta. Yhdessä betonikoostumuksessa käytettiin paisumista aiheuttavaa lisäainetta. Kaikissa betonikoostumuksissa oli kuituja ja kaikki betonit olivat huokostettuja.

Vanhan sillan alustan käsittely, valuolosuhteet ja jälkihoito olivat kaikissa tapauksissa samanlaisia. Valun paksuus oli 80 mm ja kullakin betonilaadulla valettiin sillan poikkisuunnassa 2,5 m leveä kaista. Ulkolämpötila valujen aikana oli 3 – 6 °C. Jälkihoito suoritettiin peittämällä yläpinta kostealla juuttikankaalla heti kun pinta kesti tämän ja jäätyksen estämiseksi juuttikangas peitettiin vielä eristävällä suojapeitteellä. Yläpinta pidettiin kosteana 7 vrk.

11 kuukauden seurannan jälkeen kolmessa pintavalussa ei todettu halkeamia. Näissä oli käytetty kutistumaa kompensoivaa sementtiä, tai kutistumista estävää lisäainetta. Kolmessa muussa pintavalussa oli enemmän tai vähemmän halkeamia. Keskimääräinen halkeamaleveys oli välillä 0,2 – 0,3 mm ja suurin halkeamaleveys 1 mm. Missään valussa ei todettu 11 kuukauden seurannan jälkeen pintavalun irtoamista.

Tulosten perusteella halkeamien syntymisen estäminen edellyttää uusien keinojen käyttöönottamista. Tällaisia ovat esimerkiksi kutistumista vähentävien lisäaineiden ja paisuvien betonien käyttöönottoa. Näiden käyttöönotto edellyttää kuitenkin vielä lisätutkimuksia. On selvítettävä mm. aineiden vaikutus betonin säilyvyysominaisuuksiin. Aineiden luotettava käyttö edellyttää käyttöselosteen voimassaoloa.

8 YHTEENVETO

Kansilaatan yläpintaa joudutaan korjaamaan muotoiluvaluilla jos yläpinta on valussa jäänyt epätasaiseksi, vedeneristysalustan kaltevuus ei ole riittävä vedenpoiston kannalta ja vedeneristysalustan korjausten yhteydessä, jolloin vaurioitunut betoni joudutaan poistamaan ja korvaamaan uudella. Muotoiluvalut ovat yleensä ohuita, niiden paksuus vaihtelee 20 mm:stä 100 mm:iin.

Muotoiluvalu on tyypillinen päällevalu, jonka alustan muodostaa sillan aikaisemmin valettu tai vanha kansilaatta, jonka yläpinnasta huonokuntoinen betoni on poistettu. Muotoiluvalun yleisimmät laatua koskevat ongelmat ovat valun irtoaminen alustastaan ja halkeilu. Halkeiluun liittyy usein valun irtoaminen alustastaan. Samat ongelmat koskevat tavanomaista korjausvalua.

Muotoiluvalun tartuntaan vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat alustan betonin kunto ja sen käsittely purkamistyön aikana sekä alustan puhtaus ennen valua ja valun tiivistys. Ruotsissa tehtyjen siltojen kansilaattojen korjausvalujen tartuntaa ja kuntoa koskevien tutkimusten tulosten mukaan, jos tartunta on pettänyt saumakohdasta, pääsyinä ovat olleet alustan huono puhtaus ja saumakohdan riittämätön tiivistys. Parempi tartunta saadaan yleensä, jos kasteltu alusta on yläpinnasta kuiva eikä mattakosteaa ennen valua. Kuivan tartuntapinnan paremmuus johtuu kapillaari-ilmioistä. Kuiva pinta imee kosteutta pintavalusta, jolloin saumakohdassa pintavalun vesisementtisuhde pienenee ja lujuus kasvaa.

Muotoiluvalun halkeilun kannalta ongelman muodostavat alustan ja päällevalun erilaiset muodonmuutokset ja jäykkyudet. Alustan muodostava vanha kansilaatta on kuivunut ja kutistunut. Massiivisuudesta johtuen alusta muodostaa käytännössä lähes "täysin jäykän esteen" muotoiluvalun muodonmuutoksille, joita aiheuttavat plastisessa tilassa tapahtuva kutistuminen, betonin kuivumisesta johtuva kutistuminen ja ulkoiset lämpötilanmuutokset. Alustan estäessä muotoiluvalun (päällevalun) muodonmuutoksia, syntyy tähän rasituksia. Rasitusten suuruuteen vaikuttavat tartunta alustaan, muotoiluvaluun käytettävän betonin ominaisuudet, ulkoiset olosuhteet valun aikana ja valun jälkeen sekä betonityön suorituksen laatu. Vetorasitusten kasvaessa muotoiluvalussa riittävän suuriksi, on seurauksena halkeilua.

Varhaisvaiheessa syntyvään halkeiluun vaikuttavat merkittävästi betonityön suorituksen laatu ja olosuhteet valun aikana ja sen jälkeen. Halkeilun estämisen kannalta on tällöin jälkihoidon suoritus avainasemassa. Muotoiluvalussa käytettyjen betonien koostumus ei yleensä ole normaalia "halkeama-herkempää" varhaisvaiheessa. Valun pienestä paksuudesta johtuen kosteuden haihtumiskapasiteetti on pieni, mikä lisää merkittävästi halkeiluriskiä haihtumisen ollessa sääolosuhteista johtuen suurta.

Kuivumisesta johtuvan kutistuman aiheuttaman halkeilun estämisen kannalta ovat avainasemassa betonin kutistuman suuruus ja viruma. Kuivumisesta johtuva normaalibetonin kutistuma on yleensä aina niin suuri, että ilman viruman vaikutusta muotoiluvalu ei voi pysyä halkeilemattomana. Betonin viruma pienentää huomattavasti samanaikaisesti kutistuvaan päällevaluun syntyviä vetojännityksiä ja viruman suuruuden vaihtelut selittävät osaksi sen, miksi joissakin tapauksissa päällevaluun ei synny näkyviä halkeamia ja joissakin tapauksissa syntyy. Jotta viruman ja relaksaation jännityksiä ja halkeilua pienentävä vaikutus olisi mahdollisimman suuri, on valun jälkeisten muodonmuutosten tapahduttava rauhallisesti ja hitaasti. Tämän vuoksi valun jälkeisten olosuhteiden hallitseminen on tärkeää.

Liikenteen aiheuttaman värähtelyllä ei useiden selvitysten mukaan näytä olevan merkittävää vaikutusta korjausvalujen halkeiluun ja tartuntaan. Puistolan sillalla muotoiluvalun yhteydessä tehtyjen värähtelymittausten tulosten mukaan värähtelyjen syynä on pääasiassa epätasaisuudet sillan ajoradassa ja liikuntasauvojen vieressä. Merkittävämpää värähtelyä aiheuttaa raskas liikenne, muun liikenteen aiheuttaman värähtelyn vaikutus on merkityksetön.

Puistolan sillalla tehtyjen värähtelymittausten tulosten mukaan raskaan liikenteen aiheuttamat värähtelynopeuden huippuarvot ylittivät Ruotsin siltanormien korjaustöitä koskevassa osassa annetun vaatimuksen 5 mm/s selvästi. Värähtelyjen vaikutusten pienentämiseksi liikuntasauvojen vieressä sekä sillan ajoradassa olevat suuremmat epätasaisuuden on syytä tasoittaa ennen muotoiluvalua. Myös raskaan liikenteen nopeuden rajoitus on välttämätöntä jos ajoradan pinta on epätasainen.

Muotoiluvalun laatuvaatimukset koskevat lujuutta, pakkasenkestävyyttä, tartuntalujuutta alustaan, halkeamien leveyttä ja määrää, valun minimipaksuutta, viettokaltevuutta ja yläpinnan tasaisuusvaatimusta, joka riippuu käytettävästä eristysmateriaalista.

Vaatimusten osalta halkeilun hallinta on käytännössä vaikeimmin toteutettavissa. Muu vaatimukset voidaan saavuttaa kun kaikki työvaiheet alkaen käsittäen vanhan betonin poistosta ja päättyen jälkihoitoon tehdään asianmukaisesti ja huolellisesti.

Sääolosuhteiden vaikutusta muotoiluvalun laatuun voidaan pienentää käyttämällä sääsuojia. Sääsuojiensa alla lämpötilaa voidaan säädellä tietyissä rajoissa, valuolosuhteet ovat paremmat ja olosuhteet kosteuden haihtumiselle voidaan hallita paremmin.

Halkeilun kannalta keskeistä betonin kutistumaa voidaan pienentää käyttämällä kutistumaa vähentäviä lisäaineita, paisuttavia lisäaineita ja sisäistä jälkihoitoa. Mainittuja aineita on kokeiltu ulkomailla ja tulokset ovat olleet hyviä. Näiden luotettava käyttö edellyttää kuitenkin vielä lisätutkimuksia.

LÄHTEET

- /1/ Betonghandbok, Arbetsutförande. Svensk Byggtjänst. Tukholma 1994.
- /2/ Betonirakenteet. Vedeneristyksen alustan kunnostus. Tielaitos, siltakeskus TIEL2230096-SILKO 2.240. 1993. 8 s.
- /3/ Betonityöohjeet, RIL 149-1995. Helsinki 1995. 330 s.
- /4/ Beushausen, H-D, Alexander, M, G. Bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage - an analytical model based on localised strain and stress. International RILEM Workshop, Bonded concrete overlays, Proceedings. June 7-8, 2004, Stockholm, Sweden. S. 54 - 60.
- /5/ Bro 2002. Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för underhåll av broar. Brounderhåll 2002. Publ 2002:48. Borlänge 2002. 90 s.
- /6/ Bro 2004. Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för underhåll av broar. Del 10, Förbättring. Publ 2004:56. Borlänge 2004. 35 s.
- /7/ Denarie.E. & Silfwerbrand, J., Structural behaviour of bonded concrete overlays. International RILEM Workshop, Bonded concrete overlays, Proceedings. June 7-8, 2004, Stockholm, Sweden. S. 37 - 45.
- /8/ Gagne, R., Bissonnette, B., Lauture, F., Morin., R & Morency, M. Reinforced concrete bridge deck repair using a thin adhering overlay: Results from the Cosmos Bridge experimental repair. International RILEM Workshop, Bonded concrete overlays, Proceedings. June 7-8, 2004, Stockholm, Sweden. S. 79 - 95.
- /9/ Hulshizer, A, J., Acceptable Shock and Vibration Limits for Freshly Placed and Maturing Concrete. ACI material Journal, vol. 93. 1996, s. 524 - 533.
- /10/ Huovinen, P. Jälkivaletun betonin tartunnasta ja rakenteen yhteistoiminnasta. Diplomityö. Oulun yliopiston rakentamistekniikan osasto. Oulu 1976. 49 s. + liitt. 2 s.
- /11/ Jyrsinnän vaikutus siltakannen betoniin. Tutkimusselostus nro RTE4540/03. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 31.1.2003. 14 s.
- /12/ Kovler, K & Zhutovsky. Overview and future trends of shrinkage research. Advances in Cement and Concrete. Proceedings
- /13/ Leivo, M., Holt, E. Betonin kutistuma. VTT Tiedotteita 2076. Espoo 2001. 57 s.
- /14/ Liikenteen aiheuttaman värähtelyn vaikutus ohuiden kerrosten ominaisuuksiin ja tartuntaan sekä halkeamien injektoinnin onnistumiseen. Tutkimusselostus nro RTE30583/97. VTT Rakennustekniikka. 6.11.1997. 25 s.

- /15/ Lohmeyer, G. Weisse Wannen einfach und sicher. Betong -Verlag, Dusseldorf 1985.239 s.
- /16/ Piikkausmenetelmien mekaaniset vaikutukset alusbetoniin. Tutkimusselostus nro RTE30120/97. VTT Rakennustekniikka. 11.3.1997. 49 s. + liit. 2 s.
- /17/ Mattila, A & Saksio, K. Nivalan ylikulkusillan 0-3458 korjaus . Siltatekniikan koulutuspäivät 28.-30.9.2004. Nokia. 12 s
- /18/ Peltokorpi, M. Juvan sillan kannen muotoiluvalu kesällä 2004, Tarvasjoki. Siltatekniikan koulutuspäivät 28.-30.9.2004. Nokia. 1 s
- /19/ Pigeon, M & Bissonnette, B. Tensile Creep & cracking potential. Concrete international, 1999. S. 31 - 35.
- /20/ Silfwerbrand, J., The influence of traffic-induced vibrations on the bond between old and new concrete. Bulletin No. 158, Depth. Of Structural Mechanics and Engineering, Royal Institute of Technology, Stocholm, 1992, 78 s.
- /21/ Silfwerbrand, J., Differential shrinkage in normal and high strength concrete overlays. Nordic concrete research, Publication no.19, 2/1996. S. 55 - 68.
- /22/ Silfwerbrand, J., Field tests on bonded overlays. Bonded concrete overlays, International RILEM Workshop, Bonded concrete overlays, Proceedings. June 7-8, 2004, Stockholm, Sweden. S. 97 - 106.
- /23/ Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Betonirakenteet – SYL 3. Tielaitos, Siltakeskus. Helsinki 1996. 79 s + liitt. 27 s.
- /24/ Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Kannen pintarakenteet – SYL 6. Tiehallinto, Tekniset palvelut. Helsinki 2005. 41 s + liitt. 9 s.

Espoo 2.3. 2006



Eero Punakallio
Palvelupäällikkö



Pertti Pitkänen
Erikoistutkija

JAKELU

Tilaaaja
VTT Kirjaamo

Alkuperäinen
Alkuperäinen