



RAKENNUSTIETO >

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Betonirakenteiden kutistuminen ja halkeamien ehkäisy

Juha Komonen, diplomi-insinööri
Erikoisasiantuntija, Vahanen Oy
Rakennusfysikaaliset asiantuntijapalvelut/Humi-Group
juha.komonen@vahanen.com

Haitalliset halkeamat häviävät viisailla valinnoilla

Useimmilla meistä on omakohtaisia havaintoja betonirakenteiden halkeilusta mutta näemme päivittäin halkeilemattomiakin betonirakenteita. Halkeiluun liittyy usein betonin kutistuminen ja se on betonin perusmateriaaliominaisuus.

Betonirakentamisessa on hyödyllistä tietää betonin kutistumistaipumus ja tietää milloin kutistuminen on valmistettava betonirakenteen kannalta kaikkein vaarallisin. Tällöin halkeiluongelmaan voidaan varautua etukäteen ja tarvittaviin toimenpiteisiin ryhtyä ajoissa, jolloin rakenteisiin muodostuvat useimmat näkyvät halkeamat voidaan ehkäistä.

Artikkelissa kuvataan tietoiskumaisen lyhyesti betonin kutistumishalkeamien pääsyitä, kutistumishalkeamien muodostumista ja esitetään ohjeita miten betonin kutistumishalkeilua voidaan vähentää. Artikkelissa käsitellään myös plastisen painuman ja rakenteen lämpötilaerojen aikaansaamia halkeamia.

Ilmiöt ja toimenpideratkaisut kuvataan yleisellä tasolla ja niitä voi soveltaa eri rakenteisiin. Valmistettavan rakenteen muoto ja mitat vaikuttavat siihen mitkä halkeilua aikaansaavat ilmiöt ovat kullekin betonirakenteelle ominaisia.

Kutistumisen muu vaikutus

Betonin kutistuminen aiheuttaa halkeamien lisäksi muitakin haittoja, mm. päällysteiden, pintoitteiden ja keraamisten laattojen irtoamista betonipinnoilta, liikuntasauoittamistarvetta, jännevoimien pienenemistä jne. Haittoja voidaan torjua edullisesti pienentämällä betonin kutistumaa. Esimerkiksi voidaan käyttää hyvin suuria liikuntasauumavälejä, mikä säästää huomattavasti runkokustannuksissa. Näitä asioita ei käsitellä enempää tässä artikkelissa.

Betonin kuivumiskutistuminen

Betonin kuivumiskutistuminen on pitkäaikainen, dimensioita yleensä pienentävä muodonmuutos, joka aiheutuu pääasiassa betonin mikrorakenteessa olevan veden liikkeistä ja sementtipastan hydrataatiosta. Kuivumiskutistuma voidaan määrittellä vakio- λ -lämpötilassa tapahtuvaksi aikasidonnaiseksi muodonmuutokseksi, joka aiheutuu betonissa olevan veden poistumisesta tai siirtymisestä pienemmistä huokosista suurempiin. Suurilla sementtimäärillä myös hydrataatioreaktiotuotteiden tilavuudeltaan lähötö tuotteita pienemmät lopputuotteet aiheuttavat muutoksia betonin dimensioihin. Osa kuivumiskutistumismuodonmuutoksesta on palautuvaa. Eli jos kuivunut ja kutistunut betoni kastuu, sen tilavuus suurenee.

Betonin kutistuminen tai -muu muodonmuutos esitetään yleensä jonain seuraavista yksiköistä: A mm/m, A %, 1000 A μ m/m tai 1000 A 10^{-6} . Esimerkiksi muodonmuutos 0,555 mm/m = 0,555 % = 555 μ m/m = 555 10^{-6} .

Betonin estetty kutistuma ja halkeilu

Betoni kutistuu aina kuivuessaan. Kutistuminen itsessään ei ole ongelma, mutta kutistumisen estyessä betoniin syntyy vetojännityksiä. Betoni halkeaa, kun betoniin kohdistuva vetojännitys ylittää betonin senhetkisen vetolujuuden huolimatta siitä mistä syystä vetojännitys aiheutuu. Betoni kutistuu myös aina jäähtyessään. Betonirakenteen kovettumisvaiheen lämpötilaeroista aiheutuvat lämpö- tai vetojännitykset ovat erittäin vaarallisia, sillä betonin vetolujuus on vielä alhainen. Vetojännityksen ja siitä seuraavan halkeilun syntyminen edellyttää aina estettyä muodonmuutosta. Jos betonin muodonmuutos pääsee tapahtumaan, vetojännitystä ei synny eikä halkeamaa muodostu. Kaikentyyppinen betoni halkeilee estetyt kutistuminen olosuhteissa, jos virumista tai jännitysrelaksaatiota ei pääse tapahtumaan tai ehdi tapahtua.

Estettyä, kutistuman aiheuttamaa jännitystä voi kuvailla tilanteella, jossa betoni ensin kutistuu vapaasti ja sitten se venytetään takaisin alkuperäiseen mittaansa. Kuinka suuri muodonmuutos sitten tarvitaan halkeaman muodostumiseen? Esimerkiksi puristettaessa K30 betonista valmistettua koelieriötä, jonka pituus on 300 mm ja halkaisija 150 mm, havaitaan puristusmurtumahetkellä betonilieriön puristuneen kasaan noin 0,7 mm. Mutta jos sama betonilieriö vedetään murtoon, niin tarvittava muodonmuutos on noin 0,05–0,1 mm eli halkeaman syntymiseen tarvittava muodonmuutos on pieni. Useimmat betonit halkeavat, kun niihin aiheutetaan verraten nopeasti venymä 0,1–0,2 mm/m. Betonirakenteen kokonaiskutistuma voi tyypillisesti olla noin 0,4–0,8 mm/m. Toisinaan pelkäästään plastisen vaiheen kutistuminen jälkihoidon epäonnistuessa voi olla jopa 7 mm/m.

Esimerkkejä estetytyn kutistuman betonirakenteista ovat kallioon kiinnitetty väestönsuojaseinä ja lujasti ympäröiviin seiniin kiinniraidoitettu lattialaatta. Väestönsuojarakenteen kallio-kiinnitys ja lattian kiinnittyminen seinään estävät näiden rakenteiden vapaan muodonmuutoksen. Rakenteiden kutistuminen aiheuttaa seinään ja lattiaan vetojännityksen.

Kutistumista ja halkeilua voi tapahtua betonin ollessa notkeassa eli plastisessa tilassa tai betonin kovettutua. Halkeamat voivat olla pystysuuntaisia, pituussuuntaisia, diagonaalisia, karttamaisia, verkkomaisia tai sattumanvaraisia, joista hallitsevin on pystysuunta.

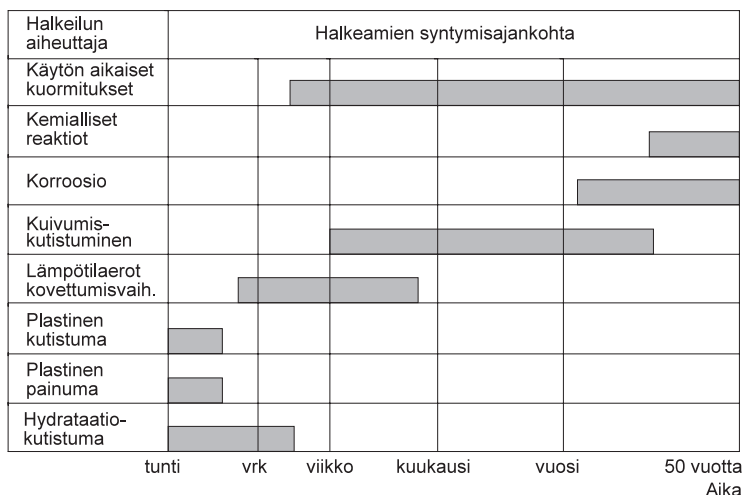
Kuivumiskutistumisen ja lämpötilaerojen lisäksi muita halkeamia aiheuttavia tekijöitä ja niiden syntymisajankohdat on esitetty kuvassa 1.

Betonirakenteen valmistus ja kutistuminen

Betonimassan kutistumispyrkimys

Ollakseen työstettävää betonin valmistuksessa käytetään käytännössä aina enemmän vettä kuin tarvitaan sementin ja veden välisiin hydrataatioreaktioihin. Tavanomaisissa rakennebetoneissa vettä on noin kaksinkertaisesti hydrataatioreaktioihin tarvittava määrä. Tämän ylimääräisen veden poistuminen eri oluudoissaan aikaansaava betoniin dimensioita pienentäviä muodonmuutoksia. Kutistumisen pääsyy on veden siirtyminen betonissa pienemmistä huokosista suurempiin tai veden poistuminen betonista. Veden liike voi tapahtua sementtipastassa betonin ollessa notkeassa eli plastisessa tilassa tai betonin kovettutua. Mitä suurempi ylimääräisen veden määrä on, sitä suurempi on betonin kutistumispyrkimys.

Betonin kutistuminen tapahtuu pääasiassa sementtipastassa, joten pastamäärän minimoiminen vähentää tehokkaasti kutistumaa. Tämä vaatii betonin runkoaineen määrän, laadun ja rakeisuuden (myös hienoainespitoisuus) optimointia. Suuren raekoon ja hyvin pakkautuvan runkoaineen omaava betoni kutistuu kuivuesaan merkittävästi vähemmän kuin pienen raekoon omaava betoni. Sellaisessa betonissa tarvittava lujuustaso myös saavutetaan vähemmällä sementillä, mikä on omiaan pienentämään kutistumaa. Esimerkiksi 32 ja 16 mm raekoon betonit poikkeavat tässä suhteessa toisistaan. Myös sementtipastan vesisementtisuhteen pie-



Kuva 1. Tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa betonin halkeilua ja aikavälit, joilla halkeamat syntyvät [1].

nantäminen ja vähän kutistuvan sementin käyttö pienentävät kutistumaa tehokkaasti.

Betonin lujuutta kasvatettaessa yleensä tarvittava suuri sementtimäärä lisää ei-toivottuja muodonmuutosominaisuuksia. Runkoaineen kärkeä kiviaines on merkittävin tekijä tämän estämisessä, sillä suuri luja kiviaines pystyy rajoittamaan sementtipastan kutistumista. Mitä suurempi betonimassan runkoainespitoisuus on, sitä pienempi betonin sementtipastapitoisuus on ja sementtipasta on betonin kutistuva osa.

Betonin käytetyin laadunarvostelukoe on puristuslujuus. Puristuslujuutta seurataan ja se yleensä aina saavutetaan vaikkei esimerkiksi betonin kiviaineksen rakeisuuskäyrä olisikaan aivan optimaalinen. Tällainen kiviaineksen rakeisuuskäyrä voidaan helposti kompensoida lisäämällä betonin sementtipastan määrää ja -lujuutta. Sementtipastan lisääntyminen ei välttämättä vaikuta puristuslujuuteen mutta kasvattaa merkittävästi betonin kutistumispyrkimystä. Saman puristuslujuuden omaavien betonien koostumus ja muodonmuutos- ja muut ominaisuudet voivat poiketa toisistaan merkittävästi.

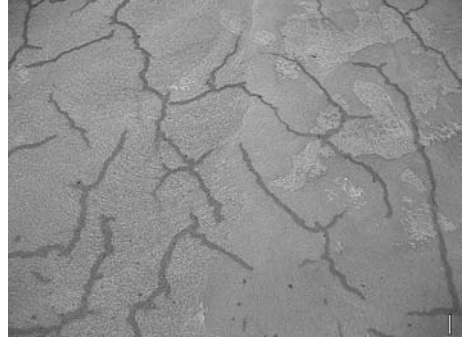
Betonimassan tilaaja voi työmenetelmiä optimoidessaan valita 8 mm kiviaineksen, vaikka myös 12 tai 16 mm kiviä tai 16 mm kiviaineksen 32 mm sijaan, jolloin saavutetaan betonimassan helpompi työstettävyys, mutta käsiteltävyyden kustannuksella myös korkeampi sementtipastapitoisuus ja suurempi kutistuminen.

Tuoreen betonin kutistuminen ja plastinen painuminen

Plastinen kutistuminen

Tuoreessa betonissa tapahtuu painovoiman vaikutuksesta eriasteista erottumista, jolloin kivet ja muut kiinteät partikkelit painuvat vielä tärytyksen jälkeen alaspäin ja vesi keveimpänä nousee ylöspäin. Saavuttaessaan betonipinnan vettä haihtuu ilmaan otollisissa olosuhteissa. Jos betonipinnalta haihtuvan veden määrä on suurempi kuin syvemmältä betonista pinnalle erottuvan veden määrä, betonipinta kuivuu, kutistuu, siihen syntyy vetojännityksiä sekä siihen voi muodostua plastisen vaiheen kutistumishalkeamia (Kuva 2).

Veden erottuminen pintaan loppuu, kun sementin sitoutuminen estää kiinteiden partikkeleiden painumisen alaspäin. Sementin sitoutumisvaiheessa betonin lujuus on yhä alhainen mutta kosteutta haihtuu edelleen betonipinnalta, mikä mahdollistaa hyvin leveiden halkeamien muodostumisen ja avautumisen betonipintaan. Plastisen kutistumisen seurauksena esimerkiksi paikallavalettuun 300 mm paksuun välipohjalaattaan on havaittu ensimmäisen vuorokauden



Kuva 2. Betonipinnassa olevia plastisen kutistuman aikaansaamia 0,5 mm leveitä halkeamia. Halkeamien ja niiden lähiympäristön kosteus on muuta pintaa korkeampi, joten tummempina näkyvien halkeamien muoto ja sijainti erottuvat selkeästi. Kuvan oikeassa alakulmassa olevan mittapylvään pituus on 10 cm.

aikana ilmaantuneen koko välipohjalaatan halkaisevia, yläpinnassa jopa 2,5 mm leveitä ja 3 m pitkiä halkeamia.

Erikoisbetoneihin, joiden vesisementtisuuhde on alle 0,45, muodostuu hyvin vähän kapillaarihuokosia, jolloin tuoreessa betonissa ei ole vettä pinnalle johtavaa kapillaarikanavistoa. Tällaisissa erikoisbetoneissa vettä erottuu betonipinnalle hyvin vähän mutta tuoreen betonin vailla vetolujuutta olevalta pinnalta haihtuu kosteutta jatkuvasti. Tämä johtaa kutistumishalkeiluun ellei veden liiallista haihtumista pinnalta estetä. Erikoisbetoneiden kostea jälkihoito tuleekin aloittaa mahdollisimman varhain.

Plastinen painuminen

Veden poistumisesta aiheutuvan kuivumiskutistumisen lisäksi tuoreen betonin halkeilua aiheuttaa betonin plastinen painuminen. Plastisen painuman halkeamia syntyy, jos tuoreen betonimassan painuminen jollain tavalla estyy. Ilmiö voimistuu, jos veden erottuminen ja kiinteiden partikkeleiden painuminen jatkuu pitkään. Plastisessa vaiheessa betonimassa painuu alaspäin muun muassa pinnassa olevan raudoitustangon molemmilta puolilta. Raudoitustanko estää yläpuolellaan olevan betonin painumisen, ”halkaisee” kohdallaan olevan betonin ja betonipintaan syntyy halkeama raudoitustangon kohtaan (kuva 3). Betonimassa painuu vapaasti myös raudoitustangon alapuolella, joten raudoitustangon alle jää tyhjä tila ja raudoituksen yhteistoiminta betonin kanssa voi jäädä puutteelliseksi. Plastisen painuman halkeamat muodostuvat tyypillisesti rakenteen yläpintaan ja ovat



Kuva 3. Betonipintaan raudoituksen yläpuolelle avautuneita plastisen painuman halkeamia. Tässä halkeamien kohdalla on yläpinnan terästanko. Betonin jälkikäytyks oli tiivistänyt rakenteen ja estänyt halkeamien muodostumisen.

yleensä säännöllisen muotoisia. Halkeamat muodostuvat betonipintaan yläpinnan raudoitustankojen yläpuolelle tai kohtiin, joissa betonirakenteen poikkileikkauksessa tapahtuu jyrkkiä muutoksia. Plastisen painuman halkeamat ovat siten säännöllisen muotoisia. Vaakasuuria plastisen painuman halkeamia voi muodostua pystyrakenteiden sivupintoihin kohtiin, joissa vaaka-suora raudoitus kantaa yläpuolellaan olevaa betonimassaa. Samasta syystä korkeiden ja kapeiden rakenteiden yläosiin muodostuu sisäisiä vaakasuuntaisia halkeamia, jos betonimassa plastisen painumisen seurauksena holvautuu raudoituksen varaan ja takertuu muotin reunoihin. Plastisen painuman halkeamat vältetään käytännössä sängen hyvin hyvällä tiivistystyöllä, johon kuuluu oikea-aikainen jälkikäytyks.

Plastisen kutistuman ja plastisen painuman halkeamat

Vaakasuraan betonipintaan muodostuneet plastisen painuman halkeamat voivat olla betonipinnassa hyvin leveitä (yleensä 2–3 mm) ja matalia. Jos ensimmäisen vuorokauden aikana betonipintaan ilmaantuneet halkeamat etenevät vain raudoitustankoihin asti, ne ovat yleensä plastisen painuman aikaansaamia mutta jos halkeamat ulottuvat syvemmälle tai rakenteen läpi, ne ovat plastisen kutistuman aikaansaamia. Plastisen vaiheen halkeamiin voi ohjautua kutistumaliikkeitä rakenteen myöhemmin kiuveessa ja kutistuessa. Tällöin halkeamat voivat kasvaa ja lopulta edetä koko rakenteen läpi. Tämän vuoksi betonirakenteen varhaisvaiheen halkeaminen tulee estää.

Plastisen kutistuman halkeamat voidaan välttää jälkihoidolla. Jälkihoidossa on oleellista

rajoittaa veden haihtumista betonirakenteen pinnalta 30 min–8 tuntia valun jälkeen ja vaikeissa olosuhteissa, kuten kesällä tuulisella säällä ja auringonpaisteesta jopa aikaisemminkin. Jos näin ei tehdä, alhaisen lujuuden omaava betonipinta halkeilee lähes varmasti. Plastisen painuman halkeamat puolestaan voidaan välttää hyvällä tiivistyksellä, johon kuuluu aina jälkikäytyks. Jälkikäytyks on ainoa tapa eliminoida plastisen painuman halkeamat erityisesti korkeiden seinämäisten tai syvien rakenteiden ollessa kyseessä.

Jälkikäytyksikohtiin kuuluvat aina myös paksuserokohdat kuten laatan palkkireunan kohta.

Betonimassan muodonmuutokset ensimmäisen 14 tunnin aikana ovat betonirakenteen vaurioitumisen kannalta kriittisiä, sillä betonin lujuus on alhainen ja syntyvät halkeamat voivat olla hyvin suuria. Betonirakenteeseen valunjälkeisenä aamuna muodostuneet epäsäännölliset halkeamat osoittavat betonipinnasta haihtuneen vesimäärän olleen liian nopeaa eli jälkihoidon olleen betonimassan ominaisuuksiin ja valuolosuhteisiin nähden puutteellista (Kuva 5). Betonirakenteessa plastisessa vaiheessa tapahtuviin muodonmuutoksiin vaikuttavat valmistettavan betonirakenteen muoto, betonin koostumus ja valuolosuhteet, joista kahteen viimeiseen voidaan vaikuttaa työtekniikka- ja työmaavaloilla.

Alkuhalkeilu on erittäin haitallista tuoreelle, plastiselle, sitoutumisvaiheessa olevalle lujuudettomalle betonille ja koko betonirakenteelle, sillä tuoreen betonin pintaan voi syntyä näkyviä ja myös näkymättömän pieniä halkeamia. Esimerkiksi laattamaisissa rakenteissa tällaiset halkeamat voidaan saada hierrolla ja pinnan viimeistelyllä suljetuksi pinnan osalta mutta syvemmälle ulottuessaan ja piiloon jäädessään ne toimivat aina heikkousvyöhykkeinä rakenteessa. Betonin kuivumiskutistuessa betonin kutistumislake kerääntyy näihin heikkouskohtiin ja rakenteeseen avautuu halkeama. Vaikka varhaisessa vaiheessa muodostuneet halkeamat olisivat pieniä, niistä voi muodostua rakenteen läpi ulottuvia halkeamia betonin myöhemmin kiuveessa ja kutistuessa.

Plastisen vaiheen aikana ja sen jälkeen betonimassa sitoutuu ja betonimassaan alkaa muodostua lujuutta. Tässä vaiheessa betonissa tapahtuu sitoutumiskutistumista, sillä sementin ja veden reaktiotuotteiden tilavuus on hieman pienempi kuin sementin ja veden yhteenlaskettu tilavuus ennen niiden sekoittamista keskenään. Sitoutumiskutistumassa kosteutta ei siirry pois betonista. Sitoutumiskutistumalle käytetään usein myös termejä hydrataatiokutistuminen tai kemiallinen kutistuminen. Sitoutumiskutistuminen muodostuu merkittäväksi runsaasti sideainetta ja sementtipastaa sisältävillä alhaisen vesisementtisuhteen omaavilla betonimassoilla.

Betonirakenteen kovettumisvaiheen lämpötilaerot

Massiivisissa rakenteissa (vahvuus yli 35 cm) sementin ja veden hydrataatioreaktioista syntyvä lämpö alkaa merkittävästi nosta valetun rakenteen lämpötilaa lujuudenkehityksen alkua noin 8–10 h kuluttua betonin valmistuksesta. Rakenteen keskiosan ja pinnan lämpötilaero nousee herkästi niin suureksi, että siitä betonirakenteeseen aiheutuva lämpöjännitys ylittää betonin alkuvaiheessa alhaisen vetolujuuden. Varsinkin estetyn kutistuman rakenteissa ja varhaisen muotinpurun jälkeen on betonipinnan ja betonirakenteen halkeiluriski talviaikaan suuri. Kun uusi rakenne valetaan kiinni aiemmin valettuun kylmään betonirakenteeseen, haitallisen suuri lämpötilaero voi aiheuttaa poikittaisia halkeamia. Aiemmin valettu kylmä rakenne tulee lämmittää ennen valua.

Kovettumisen ja hydrataatiolämpöhuipun saavuttamisen jälkeen betonirakenne jäähtyy ja sen tilavuus pienenee jäähtymisen vaikutuksesta. Esimerkiksi 30 °C jäähtyminen voi aiheuttaa 0,3 mm/m muodonmuutospyrkimyksen, mikä voi joskus olla yksinäänkin riittävä aiheuttamaan halkeilua. Myös yö- ja päivälämpötilojen vaihtelun vaikutuksesta hiemankin massiivisempaan betonirakenteeseen voi tulla 20–30 °C lämpötilaeroja etenkin talvella. Estetyn kutistuman tilanteessa uuteen rakenteeseen voi lämpötilaeroista kehittyä halkeamia ensimmäisten päivien tai viikkojen aikana, sillä betonin lujuus on alkuvaiheessa alhainen. Lämpöjännitysten aiheuttama halkeamariski tulisi aina selvittää laskelmilla etukäteen.

Valmistuksen jälkeen, betonirakenteen koveuttua, nuoreen rakenteeseen aiheuttavat vetojännityksiä rakenteen jäähtyminen, lämpötilamuutokset ja betonirakenteen kuivuminen. Betonin kuivussa siitä poistuu vettä ja samalla betoni kutistuu hyvin hitaasti. Paksussa rakenteessa ydin on vielä märkä, kun kosteuspitoisuus pintaosassa on alhainen. Betonin kutistuminen aiheuttaa betonirakenteen pintoihin merkittäviä vetojännityksiä ja halkeamia.

Betonin kokonaiskutistuma on yleensä kombinaatio kemiallisesta kutistumasta, plastisesta kutistumasta ja kuivumiskutistumasta. Mikä kutistumatyyppi on hallitsevin, riippuu betonimassasta, rakenteesta ja kuivumisolosuhteista. Betonin karbonatisoituminen aiheuttaa myös betonin kutistumista.

Betonirakenteen jälkihoito

Betonimassan ominaisuuksien lisäksi erittäin oleellinen tekijä betonirakenteiden onnistumiselle on riittävän hyvä ja riittävän pitkä jälkihoi-

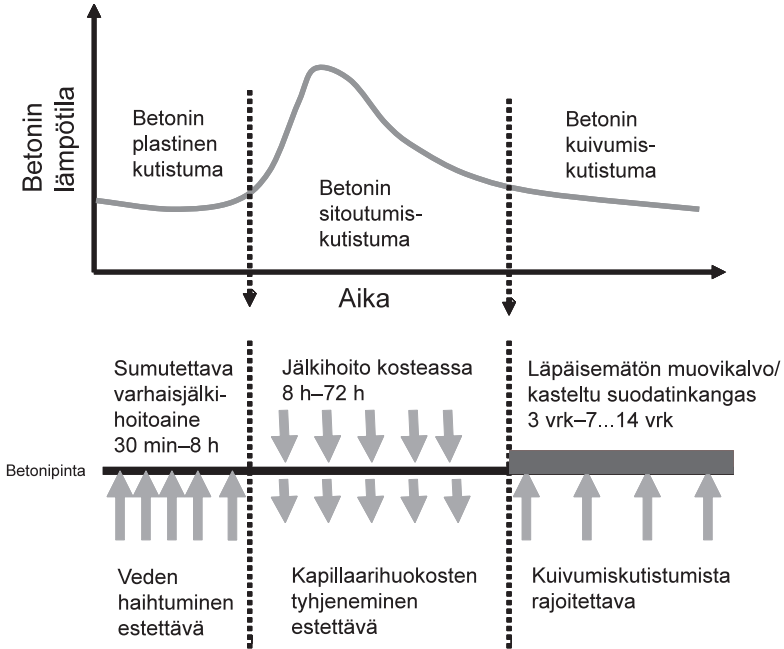
to. Jälkihoito tulee tarvittaessa aloittaa jo betonin ollessa notkeassa, muokkailtavassa tilassa ja sitä tulee jatkaa betonin kovettumisen alkuvaiheessa ja sen tapauskohtaisesti tulisi jatkaa jos saain muodossa ainakin kahden ensimmäisen viikon ajan. On elintärkeää estää betonia kuivumasta ja kutistumasta liian aikaisin eli betonipinta tulee pitää kosteana, jotta pintaan ei muodostu kerrosta, jonka ominaisuudet kuten lämpötila ja kosteuspitoisuus poikkeavat merkittävästi tuoreessa betonissa syvemmällä olevista ominaisuuksista. Betonipinnan jälkihoidon periaatekaavio on esitetty kuvassa 4. Jälkihoito parantaa betonin ominaisuuksia vähentämällä huokosten määrää, parantamalla kemiallista kestävyyttä ja estämällä halkeilua. Jälkihoitamattomasta pinnasta tulee heikko ja runsaasti pölyävä.

Varhaisjälkihoito

Betonin jälkihoito jaetaan yleensä ns. varhaisjälkihoitoon ja siihen saumattomasti liittyvään varsinaiseen jälkihoitoon. Varhaisjälkihoito tarkoittaa käytännössä sitä, että estetään veden liiallinen ja nopea haihtuminen notkean, plastisen betonin pinnasta. Jos veden haihtuminen betonipinnalta on yli 1,0 kg/m²/h, tulee ryhtyä suojaustoimenpiteisiin.

Ennen betonin sitoutumista käytettävät jälkihoitomenetelmät ovat ilmatilan sumutuskostutus tai betonin pinnalle sumutettavien nesteiden jälkihoitoaineiden käyttö. Mitään suojausta tai suoraan vettä ei tässä vaiheessa voi käyttää pinnan vaurioitumisen vuoksi. Varhaisjälkihoitoa jatketaan kunnes betoni on sitoutunut ja betonipinta kovettunut riittävästi kestämään hieron ja muut viimeistelytoimenpiteet. Mikäli pinta kuivuu liikaa ennen lujuden kehitymistä tai sen aikana, tapahtuu tuoreessa betonipinnassa plastista kutistumista ja -halkeilua. Halkeamat voidaan saada hieron avulla suljettua, mutta ne yleensä myöhemmin avautuvat ja esimerkiksi näkyvät seuraavana päivänä (kuva 5). Suuri plastinen kutistuma ilmenee yleensä pinnan verkkomaisina halkeamina, jotka vaurioittavat mm. mittatarkkuutta, kulutuskestävyyttä, säilyvyyttä, ulkonäköä ja nopeuttavat vaurioitumista ja siten lyhentävät käyttöikää. Lujudettoman tuoreen betonin pintaan voi myös syntyä hienojakoisia näkymättömän pieniä halkeamia, jotka leviävät betonin kutistuessa ja näkyvät betonin likaantuessa myöhemmin.

Plastisen kutistuman määrä on suoraan verrannollinen pinnalta haihtuvan kosteuden määrään. Sitä kasvattavat ilmavirtauksen nopeus, kuivat olosuhteet (erityisesti talvella), betonimassan sekä ilman korkealaämpötila ja suora auringonpaiste. Tällaiset olosuhteet voidaan ainakin sisätiloissa välttää hyvällä olosuhtehallinnalla, johon voi esimerkiksi kuulua ilmatilan



Kuva 4. Betonirakenteiden jälkihoidon periaatekaavio. Kuvassa esitetty sementin ja veden reaktiosta johtuva betonin lämpötilan nousu 8–24 tunnin iässä massan sekoituksesta, on esimerkiksi ohuissa lattiarakenteissa yleensä vain joitain asteita. Tässä vaiheessa betonissa tapahtuu sitoutumiskutistumista, koska sementin ja veden reaktiotuotteiden tilavuus on hieman pienempi kuin sementin ja veden yhteenlaskettu tilavuus ennen niiden sekoittamista keskenään. Tämän vaiheen vaatima kostea jälkihoito voidaan toteuttaa esimerkiksi kastellulla suodatinkankaalla ja se voi jatkua ensimmäisen tai ensimmäisten kahden viikon ajan. Jälkihoitoa tulisi tämän jälkeen vähentää asteittain.



Kuva 5. Betonirakenteeseen valun jälkeisenä aamuna muodostuneet halkeamat osoittavat jälkihoidon ja tiivistystyön olleen betonimassan ominaisuuksiin tai valuolosuhteisiin nähden puutteellisia. Kuvan oikeassa alakulmassa olevan mittapylvään pituus on 30 cm.

kostutus hienojakoisella vesisumutuksella ja ikkunoiden sulkeminen verhoilla tai peitteillä (auringonpaisteen estämiseksi).

Tuulisuuden poistaminen on erityisen tärkeää ulkotiloissa. Noin 7 m/s ilmavirtauksen on todettu aiheuttavan neljässä tunnissa jopa noin 7 mm/m plastisen kutistuman, mikä on 10-kertainen kuivumiskutistumaan verrattuna. Vastavasti 5 m/s ilmavirtaus voi aiheuttaa noin 5,5 mm/m plastisen kutistuman. Näissä olosuhteissa varhaisjälkihoito on aloitettava toisinaan jo massan oikaisuvaiheessa levittämällä muovi välittömästi oikaistun massan päälle tai sumuttamalla varhaisjälkihoitoainetta massan pinnalle. Muovikalvoa ulko-olosuhteissa käytettäessä tulee estää tuulen pääsy muovin alle. Nestemäisten ruiskutettavien jälkihoitoaineiden tarkoituksena on muodostaa betonin pinnalle kosteutta hidastava tai -läpäisemätön kalvo. Jälkihoitoaineen ruiskutusmäärä tulee ulko-olosuhteissa valettaessa

mitoittaa tuulen haihduttavan vaikutuksen mukaan. Koska aineiden tehokkuuksissa on eroja, tuotteen ominaisuudet tulee varmistaa valmistajalta tai myyjältä ennen käyttöä. Varhaisjälkihoitoainekäsittely toistetaan tarvittaessa ennen lattiapinnan hiertoa, jos pinta on päässyt kuivumaan liikaa. Jälkihoitoaineita käytettäessä tulee myös varmistaa, onko aine itsestään haihtuvaa vai joudutaanko se poistamaan mekaanisesti. Pintaan jäänyt jälkihoitoaine voi vaikuttaa heikentävästi pinnoitteiden, maalien ja päällysteiden tartuntaan. Erityisesti pinnoitettavissa rakenteissa muovikalvon ja kastelun käyttö on jälkihoito-aineita suositeltavampi jälkihoitomenetelmä. Vaihtoehtoisesti pienehköissä valuisa voidaan valutilan ilma sumuttaa kosteaksi.

Varsinainen jälkihoito

Varsinainen jälkihoito tulee aloittaa välittömästi (viimeistään ½ h) betonipinnan hierron jälkeen, vaikeissa jälkihoito-olosuhteissa jopa hierron aikana. Varsinainen jälkihoito tarkoittaa käytännössä sitä, että estetään kosteuden haihtuminen kovettuneen betonin pinnasta, kunnes betonipinta kestää kosteuden poistumisesta aiheutuvan kutistumisrasituksen. Varsinainen jälkihoitoaine (esim. varhaisjälkihoitoaine uudelleen) sumutetaan pintaan viimeisen hierontokerran jälkeen. Jälkihoitoa jatketaan levittämällä muovikalvo tai kostea suodatinkangas raken-

teen pinnalle vielä samana päivänä. Valettu rakenne tulee pitää kosteana eli se tulee suojata tai sitä tulee kostuttaa tai kastella niin pian kuin se pintaa vahingoittamatta on mahdollista. Useimmissa tapauksissa suojaus seuraavana aamuna on jo liian myöhäistä ja vaurioita pinnassa on jo tapahtunut (vesi poistunut ennen hydrataatiota, jolloin betonin pinta on pilalla eikä ole pelastettavissa). Mikäli valun olosuhteet ovat kuivattavat, tulisi käyttää parafiinipohjaista jälkihoitoainetta viimeisen hierontokerran yhteydessä. Parafiini poistetaan tarvittaessa tehokkaasti. Vaihtoehtoisesti valutilan jälkihoito-olosuhteet voidaan muuttaa otollisiksi (sisäilman kostutus, tuulisuus pois, kaikki aukot (myös tuuletusaukot) kiinni, ei betonipintaan kohdistettuja lämpöpuhaltimia).

Lopullinen jälkihoito voidaan suorittaa pinnan sitouduttua ja kovettuttua. Tässä vaiheessa jälkihoitoon voidaan käyttää kaikkia hyväksytyjä menetelmiä, jotka estävät kosteuden liian nopean poistuminen rakenteesta. Lämpötilan betonin pinnassa tulee olla koko jälkihoidon ajan vähintään + 5°C. Minimijälkihoitoaika on yleensä noin viikko valun jälkeen, mutta pitempää jälkihoitoaika voi suositella.

Betonilattioiden jälkihoito

Esimerkiksi betonilattioita tulisi jälkihoitaa joko kostealla suodatinkankaalla ja muovikalvol-



Kuva 6. Epäonnistunut varhaisjälkihoito aiheuttaa lattiapintaan vaurioita. Kuvan lattia valettiin hyvälaatuisella betonilla kesällä. Tuoreen, notkean/plastisen betonilattian pinta on tuulisuuden ja auringonpaisteen vuoksi päässyt kuivumaan liikaa, joten tuoreen/plastisen betonin pintaan on syntynyt ruutu/verkkomaista halkeilua. Kuvassa esitettyjen halkeamien väliset etäisyydet vaihtelevat pääsääntöisesti välillä 10–20 cm. Yläreunassa näkyy yksittäisiä noin 16 mm:n suuruisia runkoainerakeita.



Kuva 7. Betonipilaria jälkihoidetaan muovikelmulla muotinpurun jälkeen Kapkaupungissa Etelä-Afrikassa.

la tai tuoreen betonimassan pintaan sumutettavilla jälkihoitoaineilla vähintään kahden viikon ajan. Jälkihoitoa voidaan vähentää asteittain tämän jälkeen. Betonin jälkihoidon päätyttyä betonipinnat tulee yleensä hioa puhtaaksi sementtiliimasta, jotta tiivis sementtiliimakerros ei hidadista betonin kosteuden haihtumista sisäilmaan. Hionta poistaa pintaan sumutetun jälkihoitoaineikerroksen ja saa samalla aikaan lujan tartuntapinnan alustaan kiinnitettävälle pinnotteille.

Erittäin vaativien rakenteiden jälkihoito

Erittäin vaativissa olosuhteissa tai erittäin vaativia rakenteita valmistettaessa rakenteiden märkäjälkihoito tulee aloittaa 10 minuutin kuluessa betonin viimeistelystä. Betonipinta ei saa kuivua viimeistelyn ja jälkihoidon lopetuksen välisenä aikana. Tilaa tai pintaa vesisumutetaan viimeistelyn jälkeen siten, että pintaan ei muodostu lammikoita tai puroja. Jälkihoitomatot, esimerkiksi suodatinkangas, levitetään pintaan

10 minuutin kuluttua betonin viimeistelystä, ne vesisumutetaan kosteiksi ja niitä pidetään kosteana vesisumutuksella. Kun betoni kestää kävelyn, pinta vielä peitetään muovikalvolla. Betonipinta muovin alla pidetään märkänä 14 päivää, jolloin muovikalvo ja suodatinkangas poistetaan. Tämän jälkeen pintaan asennetaan sopivasti läpäisevä jälkihoitoaine 7 päivän ajaksi estämään liian nopea kuivuminen.

Erimuotoisten rakenteiden jälkihoito

Jälkihoito on erityisen tärkeää laattamaisilla betonirakenteilla, joilla tilavuuteensa nähden on paljon kosteutta haihduttavaa pintaa. Laatta- maisten rakenteiden epäonnistunut jälkihoito aiheuttaa lattiapintaan vaurioita (kuva 6). Tiiviit muotit jälkihoitavat muunmuotoisia rakenteita tehokkaasti. Nopeassa muottikierrossa ja vaikeissa olosuhteissa myös seinämäisiä rakennosia tulee muotinpurun jälkeen jälkihoitaa pintaan asennettavalla jälkihoitoaineella. Kapeita rakennosia, kuten pilarit tai palkit, voidaan tehokkaasti jälkihoitaa kietomalla muovikelmua niiden ympärille (kuva 7).

Kovettuvan ja kovettuneen betonin kutistumishalkeamat

Kovettunut betoni pyrkii kosteustasapainoon yleensä kuivemman ympäristönsä kanssa, jolloin betonissa oleva sementin kanssa reagoimaton vesi pyrkii poistumaan. Mitä suurempi lisävesipitoisuus, sitä suurempi on betonin kutistumispyrkimys. Kutistuminen itsessään ei ole ongelma. Ongelmia aiheuttaa, jos kutistuma estyy ja syntynyt jännitys on suurempi kuin betonin vetolujuus. Tällöin betoni halkeaa.

Betonirakenteiden valmistuksessa syntyy tilanne, jossa betonin lujudenkehitys ja kutistumista rakenteeseen kehittyvä vatojännitys kilpailevat keskenään. Jos kutistumisjännitys kehittyy nopeammin kuin betonin vetolujuus, syntyy tilanne, jossa betoni halkeaa. Jos vetolujuus pysyy koko ajan suurempana, betoni kutistuu mutta ei halkeile. Tämä kuulostaa selkeältä mutta käytännössä tilanne on monimutkainen. Tekijät, jotka vaikuttavat siihen kuinka nopeasti kutistumajännitys ja vetolujuus kehittyvät ovat: betonimassan osa-aineet, niiden suhteet ja määrät, ilman lämpötila, betonin lämpötila, ilman kosteuspitoisuus, tuulen nopeus, auringonpaiste, pinnan viimeistely, jälkihoito jne. Näiden tekijöiden luotettava arviointi on vaikeaa ja yritys selvittää jälkikäteen miksi yksi betonirakenne halkeili ja toinen ei, on vielä vaikeampaa.

Vetoviruma

Ennen halkeamishetkeä betonissa tapahtuu kutistumisjännityksen ja vetolujuuden välisen kilpailun lisäksi toinenkin kilpailu. Nimittäin betonin vetoviruma (ulkoisesta kuormituksesta aiheutuva muodonmuutos), joka aina ensin pienentää kutistumisen aikaansaamaa vetojännitystä. Vetovirumassa betoni ikäänkuin ”venyy” jännityksen suuntaan ja tämä pienentää vetojännitystä. Vetoviruma on hyvin tärkeä tekijä halkeamien välttämässä. Vetoviruman tapahtumiseksi tarvitaan rauhallinen lujuudenkehitys ja hitaat olosuhdemuutokset. Kun vetojännityksessä olevan betonin vetoviruma on täysin tapahtunut ja betonin vetolujuus ylittyy, betoniin syntyy halkeama.

Kutistumishalkeamat

Kun betonirakenne joutuu kutistumisen vaikutuksesta jännitystilaan, jännitykset etsivät tehokkaasti rakenteen heikoimmat kohdat, ja yhdistävät ne halkeamalla. Halkeamien suuruus, muoto, esiintymistapa, esiintymispaikka ja esiintymisajankohta eli rakenteen ikä auttavat halkeamien alkuperän selvittämisessä.

Estetyn kutistuman rakenteet lisäävät betonirakenteeseen kohdistuvia vetojännityksiä ja siten myös rakenteiden halkeiluriskiä merkittävästi. Yleensä halkeaman muodostaman vetojännityksen aiheuttaa usean tekijän summa.

Kutistuman määrän arviointi

Betonin kutistuman määrää voidaan arvioida esimerkiksi Rakentamismääräyskokoelman [2] tai Suomen Betoniyhdistyksen julkaisujen BY16 [3] ja BY 50 [4] laskentakaavojen avulla. Uutena vaihtoehtona rakenteen kutistumista voidaan arvioida kosteusmittaustuloksen avulla. Suomen Betonitiedon julkaisussa Betonirakenteen päällystämisen ohjeet [5] on esitetty menetelmä, jolla suhteellisen kosteuspitoisuuden mittaustuloksen avulla arvioidaan betonissa vielä tapahtuvaa kutistumista. Rakenteisiin käyttöaikana tasaantuvan pitkäaikaiskosteuspitoisuuden ollessa selvillä, voidaan kosteusmittaustuloksen avulla arvioida rakenteen jäljellä oleva kutistumaa. Mitä alhaisempi betonin suhteellinen kosteus on mittaushetkellä, sitä pienempi myös rakenteen jäljellä oleva kutistuma on.

Betonirakenteen halkeiluun voi vaikuttaa

Vaikka betoni kutistuu aina, voidaan betonirakenteen halkeiluriskiä vähentää tehokkaasti oi-

keilla menetelmävalinnoilla betonirakenteen valmistuksen aikana. Tällöin betonirakenteisiin mahdollisesti muodostuvat halkeamat ovat hyvin pieniä ja harmittomia. Tarvitaan aina hyvä etukäteissuunnittelu, valmistelu ja toteutus.

Halkeilupulman ratkaisustrategiat

Betonirakenteen halkeilupulman ratkaisustrategioita ovat: 1) varhaisvaiheen lämpötilaerojen rajoittaminen, 2) betonin lämmönkehityksen ja kutistumispyrkimyksen pienentäminen huolellisilla suhteitusvalinnoilla, 3) estetyn kutistuman olosuhteiden vähentäminen suunnitteluratkaisuilla, 4) betonin vetolujuuden lisääminen kutistumisen tapahtumishetkellä, 5) kutistumasta syntyvän vetojännityksen pienentäminen, 6) kutistumisen aloitusajankohdan lykkääminen kunnes betoni on riittävän lujaa vastaanottamaan rasituksen tai 7) kutistumishalkeamisen ohjaus haluttuihin paikkoihin. Viimeisin kohta tosin vain siirtää halkeaman paikkaa.

Vaihtoehtoisesti halkeamat voidaan toisinaan hyväksyä ja vain peittää. Usein tätä ratkaisua ei voi hyväksyä, sillä esteettisten seikkojen lisäksi betonirakenteiden halkeamat vaikuttavat pinnoitteiden ja päällysteiden tartuntaan, toimivat vaurioitteina ja vaikuttavat rakenteiden säilyvyyteen ja pitkäaikaiskestävyyteen. Halkeilleen rakenteen läpäisevyys kasvaa merkittävästi, joten esimerkiksi vesi- tai kaasutiiviysvaatimus ei silloin toteudu.

Betonirakenteiden nopea päällystäminen

Toisinaan nopeassa uudis- tai korjausrakentamisessa tulee vastaan tilanteita, joissa betonirakenteen jälkihoidosta täytyy tinkiä ja halkeilu hyväksytään tietoisesti. Esimerkiksi lattian päällystettävyyssaikataulu voi olla niin kireä, että vaikka käytetään nopeasti kuivuvia betoneja, lattiaa ei ole aikaa jälkihoitaa riittävästi vaan niitä voidaan joutua jopa kuivattamaan lämmittimillä, jolloin ne halkeilevat varmasti. Tässä tapauksessa kuivumisnopeuden maksimointi tehdään halkeilun kustannuksella. Näissä tilanteissa päällysteet tai pinnoitteet tulee suunnitella kestäämään jo ilmaantunut tai väistämättömästi tuleva halkeilu.

Betonirakenteiden halkeamien välttäminen

Ilmeisen moni pitää kutistumaa ilmiönä, johon ei voi vaikuttaa ja jonka seuraukset pitää vain kärsiä. Tosiasiassa kutistuminen on pienennettävissä hyvin tuloksin. Tarvitaan koulutusta ja tietouden lisäystä.

Estetyn kutistuman tapauksessa halkeilun välttämässä jää käytännön keinoksi betonin kutistuman ja muiden pienenemissuunnan muodonmuutosten hallinta niin, että haitallista halkeilua ei juurikaan tule. Kaikkein tärkeinta on pyrkiä pienempään mahdolliseen betonin kutistumaan. Pieniä, käytännössä haittaa aiheuttamattomia halkeamia tulee silloinkin. Vetojännitysten pienentämiskeinoina ohjataan mm. vetolujuus, vetovenymä, vetoviruma ja muut hitaat sementtikiven tapahtumat kehitymään niin, että isoja haitallisia halkeamia ei synny. Kokeusperäisesti on voitu todeta, että haitallisia halkeamia ei juurikaan tule, kun betonin kokonaiskutistuma on enintään noin 0,5 mm/m ja kun kaikki muutokset ohjataan tapahtumaan hyvin rauhallisesti. Vetovirumalla on tässä tärkeä osuus. Halkeilemattomuuden tavoite on käytännössäkin mahdollinen saavuttaa, siitä on runsaasti toteutuneita tapauksia. Mainitun 0,5 mm/m:n tehoavuudesta ja tarkemmista toimintamekanismeista odotellaan tutkimuksen keinoin saatavaa vahvistusta.

Halkeamien välttämässä on erityisen tärkeä saada betonin ja betonirakenteen varhaiskutistuma mahdollisimman pieneksi, jotta vetolujuus on hyvin kehittynyt, kun kuivuminen alkaa. Silloin myös vetoviruma pääsee tehokkaasti toimimaan. Myös betonin kokonaiskutistuman tulee olla pieni.

Raudoitus taloudellisissa määrissä ei yleensä estä betonin kaikkien halkeamien syntymistä mutta rajoittaa halkeamien etenemistä ja ottaa vastaan kuormitukset betonin vetolujuuskapasiteetin ylittyttyä.

Kutistuminen laajempaan tietoisuuteen

Kutistumisen haitalliset vaikutukset pitäisi saada laajempaan tietoisuuteen. Mistä tai keneltä pitäisi tulla heräte, että rakennusprojektin vaativan betonirakenteen valmistuksessa ollaan mahdollisesti riskialueella ja betonin kutistuma ja halkeilu on hyvää nostaa keskusteluihin?

- Rakennesuunnittelijat tuntevat periaatteessa ja myös käytännössä estetyn kutistuman aiheuttajat rakenteessa, kun ovat rakennevaihtoehtoja pohdiskelleet ja he tuntevat myös kutistuman suuruuksia numeroarvoina
- Hankintamiehet tehdessään betonista kauppoja
- I-luokan betonityönjohtaja
- Betonin toimittajan asiantuntijat
- Valvoja: ”kaiken kokenutta” valvojaa kannattaa kuunnella
- Kuka vaan missä vaan hankkeessa, ”tyhmä kysymys” on usein viisas kysymys
- Ulkopuolinen asiantuntija.

Millainen betoni ei halkeile liikaa?

- Haitallisten halkeamien muodostumisriski on pieni, jos betonin kokonaiskutistuma on enintään luokkaa 0,5 mm/m ja jos muu toimenpiteet tehdään oikein
- Betonin lämpötiloissa ja kuivumisessa tapahtuu vain erittäin hitaita muutoksia, jolloin jää aikaa jännityksiä pienentäville sekä veto- että puristusvirumalle.

Kutistumien haitalliset vaikutukset ja kutistumien pienentämismahdollisuudet pitäisi saada laajempaan keskusteluun – esimerkiksi ammattikeskustelujen kestoaiheeksi. Keskusteluun nostettua asia ei yleensä epäonnistu ainakaan pahasti.

Halkeamien välttäminen maanvaraisissa laatoissa

- Ovat estetyn kutistuman tilanteessa alustan kitkan vuoksi (ainakin osittain)
- Voivat kuivua vain ylöspäin, pinnan ennenaikainen kutistuminen pyrkii taivuttamaan laat- taakoveraksi, reunat nousevat, taivutus aiheuttaa taittumis- ja samalla halkeamia
- Halkeamat ovat taivutushalkeamia eivätkä yllä laatan läpi
- Vähän kutistuvilla betoneilla on saavutettu käytännössä halkeilemattomia laattoja
- Maanvaraisissa laatoissa valu, hyvä tiivistys, pinnan oikaisu, varhaisjälkihoito, hierto, jälkihoito ja hyvin rauhallisten olosuhdemuutosten salliminen ja suojelu ennenaikaiselta raskaalta kuormittamiselta ovat tarpeen.

Halkeamien välttäminen pintalaatoissa

- Ovat kantavaan laattaan hyvin kiinnitettyjä
- Estetyn kutistuman tilanteessa on käytettävä pienen kutistuman betonimassaa eli maltillisen lujuuden rakennebetoneja
- Niin sanottuja hiertobetoneja ei pidä milloinkaan käyttää
- Tartunnan varmistaminen kauttaaltaan onnistuvaksi on tärkeä tehtäväkokonaisuus
- Hyvä jälkihoito, rauhalliset muutokset ja suojelu kuormittamiselta ovat tarpeen
- Tyypilliset valmistusvaiheet ovat: valu, tärytys ja pinnan oikaisu jälkeen heti varhaisjälkihoitoaineen ruiskutus, hierto tyypillisesti 4 h myöhemmin, hierron jälkeen heti varsinaisen jälkihoito ja suojelu kuormittamiselta.

Betonirakenteen halkeilua vähentävät käytännön toimenpiteet

Betonirakenteen halkeilua ja betonin kutistumista vähentävät käytännön toimenpiteet ovat usean eri tekijän summa. Kun kaikki vetojännityksiä pienentävät toimenpiteet ketjutetaan ja suoritetaan kunnolla betonirakenteen valmis-

tuksen eri vaiheissa, niin halkeamien muodostumisriski on hyvin pieni, eikä halkeamia muodostu ainakaan haitallisessa määrin. Pieniä, käytännössä häittää aiheuttamattomia halkemia tulee silloinkin. Seuraavassa on ryhmitelty kuudeksi toimenpiteeksi näkemyksiä, joilla betonirakenteen kuivumiskutistumista, jäähtymiskutistumista ja halkeiluriskiä voidaan vähentää.

Toimenpide 1

On tärkeää keskustella betonirakenteen valmistusvaiheet läpi kaikkien rakenteen valmistukseen osallistuvien toimesta riittävän ajoissa ennen betonirakenteen valuja, jotta kaikilla on yhteisymmärrys lopputuotteen laadusta, sen saavuttamiseksi käytettävistä toimenpiteistä ja valmistukseen liittyvistä riskeistä. Keskusteluista laaditaan pöytäkirja, jolloin asia terästyy huomattavasti. Esimerkiksi käytettävä betonimassa, sen siirto- ja tiivistystekniikka, tuoreen-, kovettuvan- ja kovettuneen betonin jälkihoito mahdollisine lämpösuojineen tulee aina suunnitella kokonaisuutena ennen rakenteen valmistamista – tarvittaessa ulkopuolisen asiantuntijan avulla. Betonimassaa voidaan yleensä räätälöidä tai ainakin sen koostumusta jossain määrin hienosäätää kuhunkin käyttötarkoitukseen sopivaksi. Esimerkiksi betonimassan muutos vähemmän kutistuvaksi voi vaikuttaa myös betonimassan siirtotekniikkaan.

Usein tulee myös harkita, voitaisiinko betonin lujuusluokkaa alentaa. Maltillisempi puristuslujuusvaatimus saavutetaan vähemmällä sementillä ja samalla pienemmällä kutistumalla. Rakenteet, jotka oli tapana suunnitella K25-betonilla 1970-luvulla ja K30:llä 1980-luvulla, tehdään nykyään automaattisesti K40:llä.

Toimenpide 2

Betonin kutistumaan voidaan vaikuttaa esimerkiksi runkoaineen maksimiraekokoa eli betonin runkoaineosuutta kasvattamalla (tehokkain yksittäinen keino), kokonaisvesimäärää vähentämällä, sementtimäärää vähentämällä ja sementtipastan kutistumiskykyä pienentämällä eli käyttämällä jäykkiä betonimassoja ja niille sopivia työtekniikoita.

- Valitaan mahdollisimman jäykkä vähän kutistuva betonimassa ja sen edellyttämät siirtotekniikka eikä kuten nyt, siirtotekniikkaan (pumppaukseen) sopiva massa
- Runkoaineen maksimiraekoko mahdollisimman suureksi, yleensä 32 mm 16 mm:n sijasta
- Hyvin pakkaantuva runkoaine, ohjekäyriä noudatteleva
- Sementtiä minimimäärä; luokka 280–300 kg/m³ riittää todennäköisesti K40:een
- Sementtinä karkea, vähemmän kutistuva SR-sementti massiivisiin valuihin

- Vettä vähemmän kuin mihin on totuttu, noin 180 kg/m³ riittänee
- Sementtipastapitoisuudeksi alle 27 %. Tämä vaatii runkoaineen määrän ja rakeisuuden optimointia
- Betonin kutistumista vähentävän lisäaineen käyttö. Kuivumiskutistumisen väheneminen perustuu lisäaineen kykyyn pienentää betonin valmistuksessa käytettävän veden pintajännitystä, joten betonin kuivuessa mikrorakenteen kutistuu vain vähän. Näitä lisäaineita ei tiettävästi vielä ole markkinoilla Suomessa
- Valitaan arvosteluiäksi pitempi kuin 28 d, 3 kk
- Sisärakenteiden laskennalliseksi käyttöiäksi valitaan 50 v.

Toimenpide 3

Betonin lämpötilan nousuun eli rakenteeseen halkeilua aiheuttaviin lämpötilaeroihin voidaan vaikuttaa

- Valitaan valun aloitushetki lämpötilan kannalta optimaalisesti
- Betonin valulämpötila tulisi pitää niin alhaisena kuin mahdollista ja lähellä käyttölämpötilaa, jolloin lämpötilamuutokset ovat pieniä
- Varjostus auringon säteilylämmöltä. Esimerkiksi ikkunat tulee peittää
- Lämmönkehitystä voidaan vähentää sementtilaadun valinnalla (lämmönkehitys pienenee järjestyksessä Pikasementti, Rapidsementti, Yleissementti, SR-sementti) ja se myös jakaa sen pitemmälle ajalle, jolloin lämpöä ehtii poistua prosessin aikana. Vaihtoehtoisesti lämmönkehitystä voidaan vähentää seosaineilla tai siirtää lisäaineilla
- Sementtimäärää vähentämällä vähenee myös lämpötilan nousu
- Vaativissa estetyt kutistuman rakenteissa lämmönkehitys tulee arvioida laskelmilli ja ennen valua. Saadun tiedon avulla voidaan arvioida lämpötilaeroista rakenteeseen syntyvät vetojännitykset ja rakenteen lujuudenkehitys, joiden avulla voidaan laskea rakenteen halkeiluriski. Tällöin betonimassan koostumus tai vaadittavat lämpösuojat tms. voidaan mitoitaa oikein ennen valua
- Myös rakenteen jäähtymisen tulee tapahtua hitaasti
- Vaativissa betonirakenteissa lämpötilannousu ja -lasku tulee mitata rakenteesta kovettumisen aikana. Tällöin tarvittaviin suojaustoimenpiteisiin (lämpösuojat toisinaan myös kesällä) voidaan ryhtyä ajoissa.

Toimenpide 4

Betonin kuivumisolosuhteisiin voidaan vaikuttaa. Betonin kutistuman aloitusajankohtaan ja vaikutuksiin voidaan vaikuttaa merkittävästi betonin jälkihoidolla.

- Valu tulee suorittaa hallituissa olosuhteissa. Ilmavirtaukset tulee poistaa tuoreen betonin pinnalta. Tuulen kuivattava vaikutus on erittäin haitallinen
- Varhaisjälkihoito tulee aloittaa niin pian kuin mahdollista eli massan plastisen vaiheen aikana
- Betonin yläpinnan kuivumissuojaus tulee asentaa heti, viimeistään puolen tunnin kuluessa hierrosta
- Tiivistetysti voi sanoa, että jälkihoito on elintärkeä ja tulee sopeuttaa betonimassan ominaisuuksiin. Ensimmäiset 24 h ovat erittäin tärkeitä, sillä betonin lujus on alhainen ja mahdollisesti syntyvät halkeamat ovat suuria, leveitä ja haitallisia
- Betonia tulee varhaisjälkihoitaa ja jälkihoitaa niin kauan kunnes betoni on kyllin lujaa kestämään vetojännityksiä
- Käytä vähintään 7 vrk märkäjälkihoitoa
- Jälkihoito-olosuhteet tulee rekisteröidä. Niitä tulee seurata jo ennen valua, valun aikana ja valun jälkeen. Tällöin olosuhteet ovat selvillä, niihin voidaan puuttua ajoissa ja tarvittavat jälkihoitoa parantavat toimenpiteet voidaan mitoitaa oikein
- Mitattujen tuulen nopeuden ja kosteuspitoisuusarvojen perusteella voidaan arvioida veden haihtumisnopeus betonin pinnalta. Jos haihtumisnopeus ylittää $1,0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$, olosuhteet tulee järjestää betonoinnille suotuisiksi.
- Käytetään pistemäisiä raudoitustukia tai ainakaan viivamaisia raudoitustukia ei sijoiteta aivan viivasuoraan linjaan
- Nosturivalu liian yleiseksi tulleen pumppaamisen sijaan. Tärkeissä valuissa tulisi määrätietoisesti pyrkiä jassikkavaluihin, koska silloin on mahdollista käyttää jäykempää ja vähemmän kutistuvia betoneja. Ne ovat lisäksi halvempia. Nosturiaikaa saa käyttöön, kun sen tarve aikataulutetaan ajoissa. Tarvittaessa käytetään erillistä autonosturia
- Jos kuitenkin päätetään pumpata, niin: 1) tulee olla vähintään 100 mm:n siirtoputki 32 mm:n maksimiraekoon vuoksi, 2) pidetään kuitenkin tiukasti kiinni pienestä sementtimäärästä, jolloin ”liukastukseksi” tarvitaan hieman kivijauhoa $\varnothing \sim 1/100 \text{ mm}$ (sementtipartikkelin kokoluokka), notkistinta ja betonin valmistajan kokemusperäistä tietoutta, 3) käytetään notkistinta luovasti
- Betoni tulee tiivistää kunnolla. Myös jälkitärytystystekniikkaa tulee käyttää
- Suunnitellut sahasaumamat (keinotekoiset halkeamat) tulee sahata oikea-aikaisesti.

Tiivistetysti voi sanoa, että halkeamien välttämässä betonimassa on kaiken perusta ja että betonirakenteen valmistuksessa jälkihoito on elintärkeää ja tulee aina sopeuttaa betonimassan ominaisuuksiin. Varsinkin ensimmäiset 24 h ovat erittäin tärkeitä, sillä betonin lujus on alhainen ja mahdollisesti syntyvät halkeamat ovat suuria, leveitä ja haitallisia. Jälkihoidolla siirretään kutistumisen aloitusta niin pitkälle, että betoniin ehtii muodostua riittävästi lujuttua.

Toimenpide 5

Betonirakenteen kutistumaa ja halkeilua voidaan pienentää suunnittelulla, työmenetelmillä ja työtekniikoilla

- Rakenteet suunnitellaan sellaisiksi, että kutistumaliike pystyy tapahtumaan. Riskirakenteet voidaan laadunvarmistusjännittää halkeamien ehkäisemiseksi
- Estetyn kutistuman rakenteen raudoitus tulee suunnitella huolella
- Suunnittelija määrittää työmaan kanssa työsaumat ja työraudoituksen
- Raudoitus tulee tukea kunnolla
- Sijoitetaan riittävä raudoitus lähelle pintaa. Lähelle pintoja sijoitettu riittävä raudoitus jakaa halkeamat tiheään ja pieniksi, jolloin ne eivät ole haitallisia
- Käytetään pieniä raudoituksen peitekerroksia
- Käytetään muovi- tai teräskuitutekniikkaa. Kuidut jakavat halkeamat tiheään ja pieniksi, jolloin halkeamat eivät näy eivätkä ole haitallisia. Muovi-, polypropyleeni- tai muut keveät kuidut estävät tehokkaasti plastisen vaiheen halkeilua. Ei-kantava raudoitus voidaan kokonaan tai osittain korvata teräskuiduilla

Toimenpide 6

Ennen valutyön alkua tulee pitää aloitustyöpalaveri, johon myös valutyön tekijät osallistuvat. Aloituspalaverissa käydään läpi valutyön eri vaiheiden kulku ja perehdytään etukäteisvalmennuksella riskikohtiin. Näin varmistetaan hyvä työsuoritus ja aikaansaadaan laadukas lopputuote – halkeilematon betonirakenne. Palaverista laaditaan pöytäkirja.

Viitteet

- [1] Säilyvyysohjeet, BY 32. Suomen Betonitieto Oy. 1992
- [2] Suomen Rakentamismääräyskokoelma B4. 2005
- [3] BY 16. Suomen Betoniyhdistys r.y. 1984
- [4] Betoninormit BY50. Suomen Betonitieto Oy. 2004.
- [5] Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet. Suomen Betonitieto Oy. 2007.