

Betonirakenteiden laatu- poikkeamat:

Halkeilu ja korjaustoimenpiteet

TUOMAS LANKINEN

OPINNÄYTETYÖ
Tammikuu 2025

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Infrarakentaminen

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Infrarakentaminen

LANKINEN, TUOMAS:
Betonirakenteiden laatupoikkeamat:
Halkeilu ja korjaustoimenpiteet

Opinnäytetyö 62 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Tammikuu 2025

Opinnäytetyössä esitellään onnistuneen betonirakenteen mahdollistavia tekijöitä sekä erilaisia laatupoikkeamia halkeilun ja muodonmuutosten näkökulmasta. Opinnäytetyössä selvitettiin mitä rakennusprosessin eri toimijat voisivat tehdä toisin ja mitä asioita tulisi ottaa huomioon, kun käsitellään eroa toivotussa laadussa. Työ tuotettiin tutkimuksellisenä työnä, joka yhdistää teorian ja haastattelukysymysten kautta käytännön kokemusta. Idea aiheelle syntyi työharjoittelussa Kreate Oy:n työmaalla vaativien betonirakenteiden parissa.

Työssä käsitellään tärkeimmät tiedot, joita betonityönjohtaja tai suunnittelija tarvitsee laadukkaan lopputulokseen. Pääaiheena käsitellään betonirakenteiden halkeilua ja muodonmuutoksia, sekä sitä mistä ne johtuvat. Lisäksi näitä laatu-
poikkeamia käsiteltiin urakoitsijan ja suunnittelijan toiminnan näkökulmasta ja esitettiin, kuinka laatu-
poikkeamiin voivat eri osapuolet vaikuttaa. Lisäksi opinnäytetyö käsittelee korjaustoimenpiteitä ja halkeilusta sekä betonirakenteen laadun alenemasta aloitettavia toimenpiteitä.

Lopputuloksena on työ, joka käsittelee betonin eri ominaisuuksia niihin vaikuttavia tekijöitä suhteessa lopulliseen rakenteen laatuun. Tuloksena on työ, joka kertoo merkittävimmät tekijät betonityönjohtajan sekä rakennesuunnittelijan osalta, joilla molemmat osapuolet voivat vaikuttaa tai rajoittaa halkeilua ja muodonmuutoksia. Lisäksi korjaustoimenpiteistä muodostui oma osuutensa, josta lukijalle selviää millä tavoin halkeilusta ja muodonmuutoksista aiheutuneita poikkeamia on mahdollista korjata.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Civil engineering

LANKINEN, TUOMAS:
Quality Deviations in Concrete Structures:
Cracking and Repair Measures

Bachelor's thesis 62 pages, appendices 1 page
January 2025

The purpose of this thesis was to examine quality deviations in concrete structures from the perspective of cracking and repair measures. The aim was to determine what the various stakeholders in a construction project could do differently when addressing cracking and deformation in concrete. The topic for this thesis was developed during an internship at a Kreate Oy construction site.

The purpose of this thesis was to develop guidelines addressing the factors influencing cracking and deformation in concrete structures, spanning from the preparation of the concrete mix to the hardened concrete structure. The focus of the study was to examine the impact of actions taken by contractors and structural designers on cracking and shrinkage. Additionally, the thesis aimed to address repair methods for cracking and deformation, providing readers with an understanding of the various available alternatives.

The study was conducted as a research-based project that combined existing theory with practical experience. Practical experience was integrated into the thesis through an interview with an expert on the topic. The interview questions addressed key unresolved issues, and the responses were analysed and referenced throughout the study.

As a result, guidelines addressing the most significant factors related to quality deviations were created. Additionally, the interviews provided valuable insights from the perspective of a person working on-site. The topics covered in the thesis play a crucial role in quality deviations, and understanding these issues is highly important for concrete work supervisors and structural designers.

Key words: cracking, deformation, concrete repair measures

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Tausta ja tavoitteet	7
1.2	Aiheen rajausta ja merkitys	7
1.3	Tutkimusmenetelmät ja aineisto	8
2	YLEISTÄ BETONIN OMINAISUUKSISTA JA OSA-AINEISTA	9
2.1	Betonimassan ominaisuudet	10
2.1.1	Raekoko	10
2.1.2	Notkeus	11
2.1.3	Ilmamäärä	12
2.1.4	Lämpötila	12
2.1.5	Koossapysyvyys	12
2.2	Betonin pääraaka-aineet	13
2.2.1	Sementti	13
2.2.2	Kiviaines	16
2.2.3	Vesi	16
2.3	Seosaineet	16
2.3.1	Masuunikuonajauhe	17
2.3.2	Silika	18
2.3.3	Lentotuhka	19
2.4	Lisäaineet	19
2.4.1	Notkistimet	20
2.4.2	Huokostimet	20
2.4.3	Hidastimet	21
2.4.4	Kiihdyttimet	21
2.4.5	Muut lisäaineet	22
2.5	Betonirakenteen jälkihoito	22
3	LAATUPOIKKEAMAT JA VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	25
3.1	Halkeilu ja muodonmuutokset	25
3.1.1	Plastinen painuma	26
3.1.2	Plastinen kutistuminen	27
3.1.3	Lämpöliike ja lämpötilaerot	28
3.1.4	Kuivumiskutistuma	29
3.1.5	Betonirakenteen viruma	31
3.1.6	Pakkasrapautuminen	32
3.1.7	Raudoitteiden korroosio	33
3.1.8	Alkalikiviainesreaktio	34

3.2	Suunnitteluratkaisujen merkitys.....	35
3.3	Työntoteutuksen merkitys	38
4	BETONIRAKENTEIDEN KORJAUSTOIMENPITEET	40
4.1	Betonirakenteiden korjauksen kehittyminen	40
4.2	Halkeamien korjaaminen.....	41
4.2.1	Sementti-injektointiaineet	43
4.2.2	Muovi-injektointiaineet	44
4.2.3	Sulkuaineet.....	46
4.3	Betonilla suoritettavat korjaukset.....	48
4.3.1	Ruiskubetonointi	50
4.3.2	Valukorjaukset.....	54
5	POHDINTA	57
	LÄHTEET.....	60
	Liite 1. Haastattelukysymykset.....	62

ERITYISSANASTO

sementtipasta	Sementin ja veden seos, joka toimii betonissa sitovana aineena ja kovettuu kemiallisessa reaktiossa
inertti	Aine, joka ei reagoi kemiallisesti ympäristönsä kanssa
pozzolaani	Hienojakoinen materiaali, joka reagoi kemiallisesti kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen sementtimäisiä yhdisteitä
filleri	Hyvin hienojakoinen materiaali, jota käytetään betonimassan rakenteen tiivistämiseen ja ominaisuuksien parantamiseen
tarkemittaus	Mittaustekniikka, jolla saavutetaan erittäin tarkat tulokset laser- tai digitaalitekniikan avulla
IT-betoni	Itsetiivistyvä betoni, joka leviää ja tiivistyy ilman erillistä tiivistämistä säilyttäen hyvän lujuuden ja kestävyuden

1 JOHDANTO

1.1 Tausta ja tavoitteet

Betonirakenteiden laatupoikkeamat ovat rakennushankkeessa esiintyviä poikkeamia suhteessa hankkeen tilaajan vaatimaan laatuun nähden. Laatupoikkeamat betonirakenteen ulkonäön tai toiminnan osalta, ovat kriittisiä rakennushankkeen talouden ja aikataulun näkökulmasta. Tässä työssä laadulla viitataan taloudellisuuteen, asiakkaan tarpeisiin sekä rakenteen pitkäaikaiskestävyyteen, jolloin laatupoikkeama on tapahtunut muutos oletetusta laadusta. Laatupoikkeamien minimointi sekä ennen työn toteutusta niihin johtavien syiden tunnistaminen ovat jokaisen toimijan osalta merkityksellisiä hallita.

Betonille halkeilu on ominaisuutena luonnollinen, jota ei ole mahdollista estää kokonaan. Halkeilu betonissa johtuu sen heikosta vetolujuudesta, jolloin sen ylittyessä betonirakenteeseen muodostuu halkeama. Perinteisesti halkeilun syy on kuivumiskutistuma tai kuormituksista johtuva halkeilu. Huomioitavaa on, että halkeilulle on olemassa monia eri syitä, eri toimijoiden tuloksena. Halkeamat betonirakenteissa jaetaan varhaisvaiheen halkeamiin ja kovettuneessa betonissa tapahtuviin halkeamiin. Sitoutumisen sekä kovettumisen aikana suoritettujen toimenpiteiden sekä valintojen merkitys laadukkaan lopputuloksen saamiseksi ovat kriittisiä. Betonirakenteen suunnittelijan sekä työntoteuttajan on merkittävän tärkeää ymmärtää mitä betonirakenteessa tuona ajanjaksona (1...2 vrk massan valmistuksesta) tapahtuu ja kuinka eri tekijöihin on mahdollista vaikuttaa. Lisäksi on tärkeää tietää mitkä tapahtuvista tekijöistä ovat kriittisiä betonirakenteen halkeilua ajatellen.

1.2 Aiheen rajaus ja merkitys

Opinnäytetyössä tavoitteena on esittää betonirakenteiden laatupoikkeamien eri esiintymiä lähtökohtaisesti halkeilun, muodonmuutosten ja muiden eri työvirheidensä kautta. Lisäksi niihin johtaneita syitä sekä niiden korjaustoimenpiteitä käsitellään tässä työssä. Tarkoituksena on havainnollistaa eri rakennushankkeen

osapuolten oman toiminnan vaikutusta lopulliseen tulokseen ja esittää ratkaisuja niiden parantamiseksi. Lisäksi laatupoikkeamien korjaustoimenpiteitä käsiteltäessä on tarkoituksena muodostaa lukijalle käsitys siitä, kuinka betonirakenteita on mahdollista korjata, sekä lyhyesti kuinka se vaikuttaa rakennushankkeen talouteen ja kokonaisaikatauluun. Aihe rajauksineen on yhdessä opinnäytetyön ohjaajien kanssa muodostettu siten, että työn kirjoittaja kehittyi itse aiheesta parhaiten ja että aihe käsittelisi mahdollisimman montaa eri tilannetta ja tekijää betonirakentamisessa.

Aiheena betonirakenteiden halkeilu ja muut laatupoikkeamat ovat laaja, mutta tässä työssä on keskitytty laatupoikkeamista etenkin halkeiluun ja muodonmuutoksiin sekä niihin johtaviin syihin sekä korjaustoimenpiteisiin. Työssä käsitellään myös betonimassan osa-aineita ja ominaisuuksia, sekä niiden vaikutusta lopputulokseen. Opinnäytetyön aiheen merkitys on tärkeä, koska aihe käsittelee eri osapuolten vaikutusta betonirakenteiden laatupoikkeamiin. Vaikutusten ja syiden ymmärtäminen on suunnittelijalle sekä betonityönjohtajalle välttämätöntä laadukaana lopputuloksen takaamiseksi. Tavoitteena opinnäytetyössä on luoda työ, joka yhdistää aiheen osalta betonirakentamisesta käytännön ja teorian sekä tarkastelee syitä eri toimijoiden osalta, jotka ovat johtaneet laatupoikkeamaan.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja aineisto

Tarkoituksena on tuottaa tutkimuksellinen opinnäytetyö, jonka avulla saadaan yhdistettyä tutkittu tieto ja eri määräykset yhteen työelämän kokemuksen ja käytäntöjen kanssa. Opinnäytetyössä käytetään aineistona erilaisia betonitekniikkaa käsitteleviä lakeja, asetuksia, ohjeita sekä kirjallisuutta. Lisäksi opinnäytetyössä on hyödynnetty betonirakentamisen parissa pitkään työskennelleiden osaamista ja ammattitaitoa haastatteleamalla. Haastattelujen pohjalta opinnäytetyössä on tehty erilaisia ratkaisuja ja päätelmiä teorian tueksi. Lisäksi haastattelujen avulla opinnäytetyöhön saadaan arvokasta käytännön näkökulmaa ja kokemusta. Haastattelukysymyksien (Liite 1) vastaukset opinnäytetyön kirjoittava säilyttää vain itsellään.

2 YLEISTÄ BETONIN OMINAISUUKSISTA JA OSA-AINEISTA

Ominaisuuksiltaan betonimassa ja myöhemmin kovettunut betoni, muodostetaan suhteituksen avulla. Suhteituksessa betonille määritetään resepti eli nimellislujuuden pohjalta muodostetaan tarvittavat määrät kiviainekselle, sementille, vedelle sekä mahdollisille eri lisäaineille. Suhteitusta toteutetaan tietokoneohjelmilla tai manuaalisesti niin sanotulla Nykäsen suhteitusmenetelmällä, johon pääosin ohjelmatkin pohjautuvat. Suhteitusta on mahdollista muuttaa ketterästi halutun betonilujuuden pohjalta tai käyttökohteen mukaan, lisäksi työmenetelmät ja betonointi olosuhteet vaikuttavat suhteituksen tekemiseen. Määritetyillä osa-aineilla on merkittävä vaikutus huokosrakenteeseen ja siten myös betonin lujuuteen ja tiivyyteen. Yleisesti merkittävimmät tekijät ovat eri muodonmuutokset, viruma, halkeilu ja betonin tiivys, näitä tekijöitä opinnäytetyössä tarkastellaan tarkemmin myöhemmin. Suomen sääolosuhteissa merkittävimmät ominaisuuden tekijät ovat pakkasenkestävyys ja pakkas-suolarasituksen kestävyys. Vesi-sementtisuhteen ollessa alhainen, on betoni mahdollisimman tiivistä ja lujaa, joka vaikuttaa suoraan haitallisten aineiden tunkeutumaan betonissa. Lisäksi huokosten määrän kasvu heikentää aina betonin lujuutta ja säilyvyyttä, paitsi pakkasenkestävyyttä.

Betonin ominaisuudet jaetaan yleisesti betonimassan ominaisuuksiin, sitoutumisvaiheessa ja varhaisessa kovettumisvaiheessa olevaan betoniin sekä kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Betonityönjohtajan on tärkeää tietää ominaisuudet eri tilanteissa, koska tällöin on mahdollista saavuttaa laadukas lopputulos. Suunnitteluratkaisujen osalta merkittävimmät tekijät ovat betonin ominaisuuksien huomioiminen rakenteiden suunnittelussa. Kohteelle sopivan lujuuden valinta ja kutistumien minimointi ovat merkittävä syy tuntea betonin ominaisuudet eri vaiheessa.

2.1 Betonimassan ominaisuudet

Betonimassan ominaisuuksien määrittely ja valinta ovat tärkeä tekijä betonoinnin onnistumiseksi. Ominaisuudet tulee tuntea ja valita siten, että betonimassa soveltuu muokattavuuden ja koossapysyvyyden pohjalta toteutettavaan rakenteeseen. Rakenteen toteutuksen osalta tärkeät tekijät ovat betonimassan käsittely- ja betonointitapa. Betonimassan ominaisuuksia määrittää suunnittelija jo suunnitteluvaiheessa, mutta betonityönjohtajan täytyy tarvittaessa muokata ominaisuuksia esimerkiksi työntoteutuksen tai tiheän raudoituksen takia. Ominaisuudet ja niiden vaikutukset lopulliseen rakenteeseen on tällöin syytä tiedostaa.

Ominaisuuksien valinnan ja muokkaamisen jälkeen tavoitteena on suunnitelmien mukainen rakenne, joka pitää sisällään sille asetetut vaatimukset, lujuuden ja säilyvyyden. Ratkaisevana tekijänä on onnistunut työntoteutus, eli urakoitsijan yhteistyössä suunnittelijan kanssa säätämä betonimassa kyseiselle rakenteelle. Tärkeimpänä tekijänä voi pitää betonimassan muokattavuutta niin massan siirtotavan, kuin tiivistämisen osalta.

2.1.1 Raekoko

Betonimassan työstettävyyden kannalta yksi merkittävimpiä tekijöitä eli maksimiraekoko. Sillä tarkoitetaan valmistettavan massan kiviaineksen suurinta kokoa. Maksimiraekoon määrittämiseen betonoinnissa vaikuttaa rakenteen sisältämä raudoitus sekä rakenteen omat mitat. Se tulisi määrittää mahdollisimman suureksi, jolloin betonimassan vedentarve vähenee, sementtipastan määrä on pienempi sekä käytölle haitallinen kutistuma pienenee.

Yleisesti maksimiraekoko on 8, 12, 16 tai 32 mm. Yleisenä ohjeena pidetään tavanomaisissa rakenteissa maksimiraekooksi $\leq 1/3$ betonoitavan rakenteen paksuudesta. Lisäksi on huomioitava, että betonia pumpattaessa muottiin, on maksimiraekoon oltava $1/3$ pumppauskaluston putken halkaisijasta. Vaatimuksena kuitenkin on betonimassan hyvä työstettävyys, jolloin tiheä raudoitus tai erilaiset muodot valettavassa rakenteessa määrittelevät lopullisen maksimiraekoon.

2.1.2 Notkeus

Betonimassan notkeus vaikuttaa suoraan valmiin betonipinnan viimeistelyyn ja betonimassan työstettävyyden osalta. Betonityönjohtaja määrittelee betonimassan notkeuden valettavan rakenteen, tiivistämistavan ja massan siirtomenetelmien mukaiseksi. Merkittävin tekijä on tiivistämistapa, koska notkeus on helpointa määritellä sen mukaan, kuinka työryhmällä on mahdollista tiivistää betonia. Standardin SFS-EN 12350-2 mukaisesti notkeus määritellään seuraavasti:

- Luokka S4, painuma 160...210 mm
- Luokka S3, painuma 100...150 mm
- Luokka S2, painuma 50...90 mm

Painuma määritellään erillisellä painumakokeella, jossa betoni tiivistetään kartioon ja kartio nostetaan irti. Alkuperäisestä sijainnistaan mitataan painuman korkeus, jolla mitataan notkeutta betonimassalle (By 201 2018, s.70).

Notkeuden eri luokista S3 on yleisin käytettävä notkeus. Paikallavalettavissa kohteissa syy S3 tai notkeamman massan käytölle on, että pumppaamalla siirrettäessä betonimassan on oltava notkeudeltaan vähintään S3 -luokkaa. Lisäksi S4 ja notkeammat massat ovat myös mahdollisia sekä parantavat betonin työstettävyyttä. On kuitenkin huomioitava, että riskit betonimassan erottumiselle ja varhaisvaiheessa tapahtuvalle halkeilulle kasvavat mitä notkeampaa massaa käytetään. Muut luokan betonimassan notkeudelle ovat puristustärytettävä, maakooste, hyvin jäykkä, jäykkä ja plastinen, jotka vaativat muita tehokkaampia tiivistystapoja, kuin perinteisen sauvatärytyksen.

Betonimassan notkeus vähenee tasaisesti sementin ja veden välisen kemiallisen reaktion seurauksena, tätä kutsutaan massan jäykistymiseksi. Jäykistyminen voi myös nopeutua lämpötilan nousun, veden haihtumisen tai notkeutta lisäävien aineiden vaikutuksen loppumisen myötä. Normaaliolosuhteissa betonimassa on 1...2 tuntia työstettävää. Työstettävyyden kestoa on mahdollista pitkittää useilla tunneilla lisäaineiden eli hidastimien avulla. Betonityönjohtajan tulee kuitenkin

huomioida mahdollisten hidastimien käytössä niiden vaikutus betonimassan vedenerottumiseen ja vedenhaihtumiseen. Lisäksi on huomioitava myös plastinen painuma ja kutistuma.

2.1.3 Ilmamäärä

Ilmamäärä betonimassassa vaikuttaa suoraan huokosten määrään lopullisessa betonirakenteessa. Normaali rakennebetonin ilmamäärä on 1...2 % massan tilavuudesta. Huokosia lisäävillä lisäaineilla on mahdollista nostaa ilmamäärä 4...8 tilavuusprosenttiin. Huokosten lisäämisellä pystytään kasvattamaan kovettuneen betonin pakkasenkestävyyttä, eli käytännössä kovettuneen betonin kestävyttä toistuvaa jäätymistä ja sulamista vastaan. Ilmamäärää kasvattaessa on huomioitava suunnittelijan sekä betonityönjohtajan, että betonin kutistuminen suhteessa huokostamattomaan betoniin kasvaa, koska sementtipastan määrä kasvaa.

2.1.4 Lämpötila

Betonimassalla ihanteellinen lämpötila on noin + 20 °C. Lähtökohtaisesti vähimmäislämpötilana sitoutumisen ja kovettumisnopeuden takia pidetään +15 °C. Lämpötila on isossa osassa betonivalujen toteutuksessa, talvella on huomioitava lämmön- ja lujuudenkehitys, kun taas massiivissa paikallavalettavissa rakenteissa lämpötilaa on lähtökohtaisesti rajoitettava pääsemästä liian korkeaksi. Talvella lämpötilan lisäys lisää myös betonimassan vedentarvetta, joka taas lisää kutistumista. Liian korkeaksi päästetyssä lämpötilassa taas betonin lujuusominaisuudet alenevat ja lisäksi sementin normaali hydrataatio häiriintyy.

2.1.5 Koossapysyvyys

Koossapysyvyydellä tarkoitetaan betonimassan osalta karkean kiviaineksen ja sementtiliiman erottumista sekä veden erottumista tasoitetun betonin pintaan. Lähtökohtaisesti vettä erottuu valetun betonirakenteen vaakapintaan tai muottipintoihin, jossa vesi pyrkii siirtymään ylös. Veden erottuminen tulee rakenteelle haitalliseksi, kun se vaakapinnoilla ollessaan lammikoituu ja alentaa pintojen lujuutta sekä lisää halkeilua. Lisäksi betonimassan alhainen lämpötila tai jäähtyminen alle noin 15 °C lisää veden erottumista.

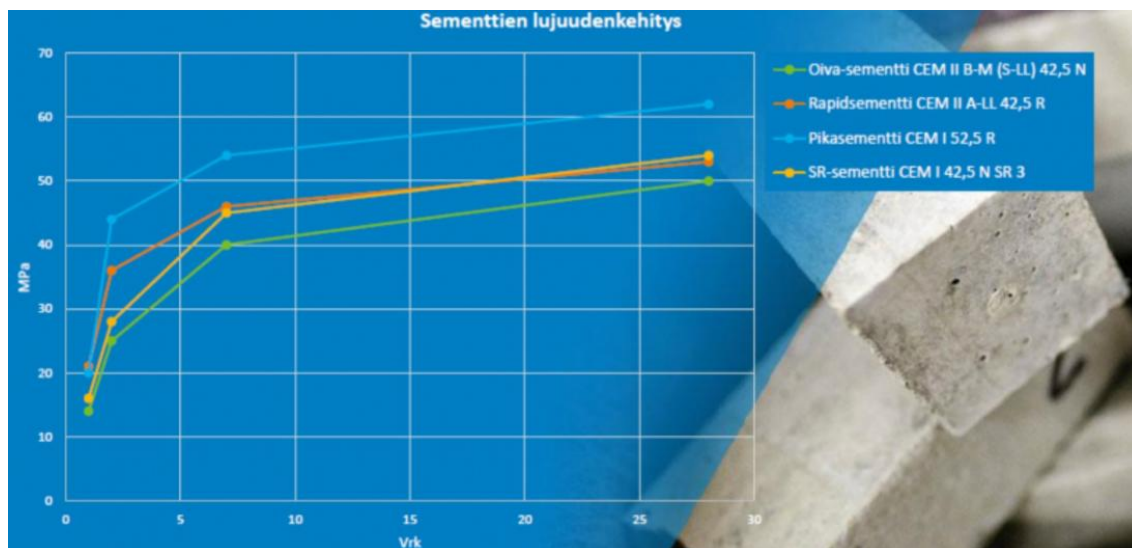
Suomen betoniyhdistyksen julkaisun BY201 (2018) mukaan karkean kiviaineksen ja sementtiliiman erottuminen tapahtuu kuljetuksen tai jo sekoituksen aikana. Tällainen erottuminen tuo merkittäviä haittoja kovettuneeseen rakenteeseen, kuten lujuuden alenemaa, lujuusvaihtelua eri osissa rakennetta sekä kutistumisen ja halkeilun lisääntymistä. Lisäksi betonipinnan virheet, vauriot ja värierot lisääntyvät erottumisen myötä. Erottuminen korostuu notkeilla massoilla sekä korkealujuusbetoneilla ja itsetiivistyvillä betoneilla. Itsetiivistyvän betonin osalta pienetkin vaihtelut veden, sementin ja lisäaineiden määrissä voi johtaa merkittävään erottumiseen. Betonityönjohtajan tulee tuntea erottuneen betonin ulkomuoto ja tiedostaa, että erottunutta betonimassaa ei saa käyttää valettavaan rakenteeseen.

2.2 Betonin pääraaka-aineet

Betonin ominaisuudet valitaan aiemmin mainittua suhteitusta hyödyntämällä. Betonin pääraaka-aineita ovat vesi, kiviaines ja sementti. Lisäksi betoniin voidaan lisätä erilaisia seos- ja lisäaineita tuoreen betonin työstettävyyden parantamiseksi tai kovettuneen betonin lujuuden, tiiviiden ja säilyvyysominaisuuksien lisäämiseksi. Osa-aineiden keskinäisellä suhteella voidaan helposti muokata betonin ominaisuuksia haluttuun suuntaan. Lisäksi osa-aineiden laatu on merkittävä tekijä betonin ominaisuuksiin.

2.2.1 Sementti

Osa-aineena sementti on hienoksi jauhettua epäorgaanista materiaalia, joka veden kanssa reagoidessaan muodostaa lujan lopputuotteen. Tästä reaktiosta syntyvä sementtipasta liittyy yhteen betonin muut ainesosat. Sementti on vaikutukseltaan merkittävä tuoreen sekä kovettuneen betonin ominaisuuksissa. Lisäksi kemiallinen koostumus sementissä vaikuttaa merkittävästi betonin työstettävyyteen, lujuuden- ja lämmönkehitykseen sekä betonin säilyvyyteen. Valmis jauhettu sementti syntyy monivaiheisen valmistusprosessin kautta. Prosessissa murskaus, jauhatus ja eri lämmitysvaiheet muodostavat sementtiklinkkeriä, johon myöhemmin sekoitetaan halutussa suhteessa seosaineita ja kipsiä. (Finnsementti 5.)



Kuva 1: Finnsementin valmistamien sementtien lujuudenkehitys vakio-olosuhteissa (Finnsementti)

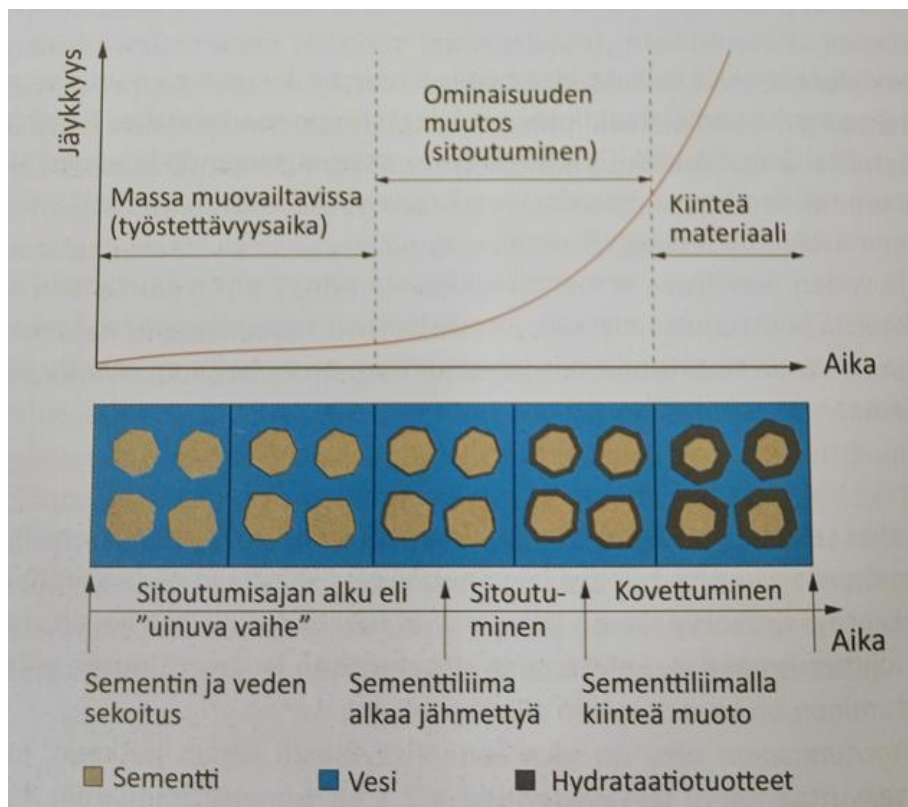
Betonin valmistamiseen käytettävän sementin tulee olla CE-merkittyä ja täyttää standardin SFS-EN 197-1 *Osa 1 Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus vaatimukset* (By 201 2018, 29). Standardin tunnistaa yhteensä 27 sementtityyppiä, mutta BY65 (2021) betoninormien mukaan vain osa näistä soveltuu käytettäväksi sääolosuhteisiimme. Standardi jakaa sementit koostumuksen perusteella viiteen pääryhmään:

CEM I	Portlandsementti
CEM II	Portlandseossementti
CEM III	Masuunikuonasementti
CEM IV	Pozzolaanisementti
CEM V	Seossementit

Betoninormit BY50 (2012) taulukko 4.2 esittää tarkemmin sementtilaji tyypit ja seokset sekä kuinka ne soveltuvat tietyille lujuuksille. Sementtiluokittain seossuhteet ovat erilaisia ja siten myös niiden käyttökohteet eri lujuuksissa vaihtelevat. Suomessa käytetään pääosin seuraavia suomalaisia rakennussementtejä tuotenimiltään:

- Plussementti (CEM II/B-M(S-LL) 42,5N)
 - o Yleisesti käytettävä joka kohteen sementti. Normaalisti kovettuva.

- Rapidsementti (CEM II/A-LL 42,5 R)
 - Tärkeimpiä käyttökohteita lattiavalut ja talvibetonoinnit. Nopeasti kovettuva.
- Pikasementti (CEM I 52,5 R)
 - Nopea alkulujuudenkehitys, soveltuu elementtiteollisuuteen, talvibetonointiin, korkealujuusbetoneiden valmistukseen. Nopeasti kovettuva.
- SR-sementti (CEM I 42,5 N SR 3)
 - Soveltuu erityisesti sulfaattirasituksen alaisiin kohteisiin. Normaalisti kovettuva portlandsementti.
- Valkosementti (yleisesti CEM I 52,5 N)
 - Käytetään pääosin julkisivuelementtien valmistuksessa ja kuiva tuotteissa. Ominaisuudet perustuvat melkein raudoittamattomaan erikoisklinkkeriin, puhtaanvalkoinen väri ja hyvät lujuusominaisuudet.



Kuva 2: Sementtiliiman sitoutuminen ja kovettuminen ajan funktiona (BY201 2018 s. 36)

Kuvassa 2 on merkitty sementin ja veden muodostaman sementtiliiman sitoutuminen ja kovettuminen ajan funktiona. Sementin ja veden sekoituttua seos on

aluksi notkeaa, mutta tietyn ajan kuluttua sementti alkaa sitoutua, kun sementtipasta hyytelöityy ja menettää plastisuuttaan. Ominaisuuksiltaan sementillä voidaan lisätä betonimassan ja -rakenteen työstettävyyttä, lujuutta, rajoittaa muodonmuutoksia ja halkeilua sekä vaikuttaa lämpötilan muodostumiseen betonoinnin aikana ja jälkeen.

2.2.2 Kiviaines

Betonin valmistuksessa käytettävällä kiviaineksella tarkoitetaan rakeista materiaalia kuten hiekkaa, soraa ja kalliomurskettä. Merkittävyydeltään kiviaines on tärkeässä roolissa, koska sitä on betonissa noin 65...80 %. (By 201 s. 43) Kiviaineksena tulee käyttää standardin SFS-EN 12620 *Betonin kiviainekset* mukaista CE-merkittyä kiviainesta. Kiviaineksen ominaisuudet jaetaan geometrisiin-, kemiallisiin-, mekaanisiin- ja fyysisiin ominaisuuksiin. Lähtökohtaisesti geometrian pohjalta kiviaineksen tulee täyttää rakeisuuden ja suunnittelun asettamat vaatimukset.

2.2.3 Vesi

Betonimassan valmistuksessa käytettävän veden tulee olla puhdasta, jotta se soveltuu sellaisenaan käytettäväksi. Lähtökohtaisesti vesijohtovesi ja juomakelpoinen luonnonvesi soveltuu käytettäväksi betonimassassa. Tietyin arvoin testauksessa varmistetun betoniteollisuuden prosessista talteen otetun veden käyttö on myös mahdollista. Vesi ei saa sisältää paljoa levää tai muita pieneliöitä eikä myöskään saa vaahdota. Lisäksi haitallisia aineita ovat öljyt ja rasvat, jotka vaikeuttavat sementin hydratoitumista. Partikkelit voivat kiinnittyä sementtihiukkasten pintaan ja täten estää reaktion kulun tai heikentää tartuntaa runkoainerakeisiin. Lisäksi ne voivat aiheuttaa ylimääräistä ilmaa betoniin.

Käytettävän veden pitoisuuksista on säädetty kloridin osalta raja-arvo käyttökohteen mukaan. Veden täyttäessä kloridin osalta annetut raja-arvot ja sen ollessa puhdasta on vesi lähtökohtaisesti aina valmista käytettäväksi betonimassaan.

2.3 Seosaineet

Mineraalisia seosaineita voidaan hyödyntää betonin side- ja runkoaineena. Niiden kelpoisuus todennetaan CE-merkinnällä, rakennustuotteiden tuotehyväksyntälain mukaisella varmennustodistuksella tai tyyppihyväksynnällä. Käytännössä kaikki Suomessa betonin valmistukseen käytettävät seosaineet ovat CE-merkityjä. (By 201 2018 s.56) Seosaineiden avulla betonimassasta saadaan irti haluttuja ominaisuuksia. Lisäksi yksi syy seosaineiden käyttöön sementin lisänä tai korvaavana ainesosana on taloudelliset ja ympäristölliset edut teollisuuden jätteen ja sivutuotteita hyödyntämällä. Seosaineista kemiallisesti reaktiiviset vaikuttavat positiivisesti betonin lujuudenkehitykseen. Seosaineista ne, jotka ovat betonin normaalilämpötilassa inerttejä käytetään pääosin erikoisbetoneissa, kuten itsetiivistyvien betonien ja korkealujuusbetonien valmistuksessa. Mineraaliset hienoainekset voivat parantaa partikkelien pakkautumista betonissa, sen mekaanisia ja kestävyysominaisuuksia sekä tuoreen betonin reologisia ominaisuuksia. Betonin valmistuksessa käytettävien seosaineiden suurimmista sallituista määristä on määritely laskentakaavat eri rasitusluokille (kuva 3), joten seosaineiden käytön enimmäismäärät ovat helposti määriteltävissä.

Rasitusluokka	Suurin sallittu seosainelisäys [%]		
	Masuunikuona	Lentotuhka	Silika
X0 XC1	$\frac{(100 - k_s - 0,053k_s) - 1,00lt - 9,0sil}{0,053}$	$\frac{(100 - k_s - 1,00lt_s) - 0,053k - 9,0sil}{1,00}$	$\frac{(100 - k_s - 9,0sil_s) - 0,053k - 1,00lt}{9,0}$
XC2, XC3 XC4, XS1 XS2, XD1 XD2, XF1 XF3, XA1	$\frac{(100 - k_s - 0,25k_s) - 2,22lt - 9,0sil}{0,25}$	$\frac{(100 - k_s - 2,22lt_s) - 0,25k - 9,0sil}{2,22}$	$\frac{(100 - k_s - 9,0sil_s) - 0,25k - 2,22lt}{9,0}$
XS3 XD3	$\frac{(100 - k_s - 0,25k_s) - 2,22lt - 9,0sil}{0,25}$	$\frac{(100 - k_s - 3,33lt_s) - 0,25k - 9,0sil}{3,33}$	$\frac{(100 - k_s - 9,0sil_s) - 0,25k - 2,22lt}{9,0}$
XF2, XF4	Vaatimukset InfraRYL 2006 <i>Sillan betonirakenteet</i> kohdan 42020.1.2 mukaan		

Kuva 3: Laskentakaavat seosaineiden suurimmille sallituille määrille eri rasitusluokissa

2.3.1 Masuunikuonajauhe

Masuunikuonajauhe on hienoksi jauhettua granulointua masuunikuonaa, jolla on piilevät hydrauliset ominaisuudet. Masuunikuona on pääosin raakaraudan val-

mistuksen sivutuote. Kuonajauhe jaetaan kolmeen laatuun granuloituun, pelletoituun ja ilmajäähdetyyn kuonaan, ominaisuuksiltaan granuloitu on parasta, kun ilmajäähdetty huonointa. Se muodostuu nopeasti jäädyttämällä masuunissa syntyneestä silikaattisulatteesta. Kiintotiheys masuunikuonajauheella on 2900...3100 kg/m³ ja raekoko hieman sementtiä karkeampaa. Aktiivisuudeltaan masuunikuonajauhe sementtiin verrattuna on By 65 betoninormien 2016 mukaan 0,80 tai 1,00 rasisluokan mukaan. Väriominaisuuksiltaan masuunikuonajauhe vaalentaa betonin sävyä.

Mainitut hydrauliset ominaisuudet alkavat sementin ja veden reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin vaikutuksesta. Reaktion herätessä alkaa kuona kehittämään lujuutta. Veden tarve on alhainen, joten masuunikuonajauhe notkistaa betonia. Lisäksi jauhe laskee huomattavasti betonin hydrataatiolämpöä, joten sitä käytetään paljon massiivisten rakenteiden betonimassassa. Käyttö kasvattaa myöhempiä lujuutta, mutta alentaa varhaislujuuksia betonirakenteessa. Lujuudenkehitys masuunikuonabetonilla hidastuu alhaisissa lämpötiloissa ja taas korkeissa lämpötiloissa nopeutuu. Lisäksi jauheen käyttö lisää betonin sulfaatinkestävyyttä, mikäli kuonajauheen osuus on yli 70 % sideaineesta, sideaineyhdistelmä katsotaan sulfaatinkestäväksi. Muita betonirakenteeseen vaikuttavia tekijöitä kuonajauheen käytöstä ovat viruman ja karbonatisoitumisnopeuden lisääntyminen ja pakkas-suolakestävyyden heikentyminen.

2.3.2 Silika

Silika on erittäin hienojakoinen pozzolaani, joka erotetaan ferropiin ja piin valmistuksessa muodostuvista savukaasuista. Kiintotiheydeltään silika on 2200 kg/m³ ja raekooltaan < 1 µm. Huomioitavaa silikan käytössä on vedentarpeen lisääntyminen, jolloin on käytettävä aina vedentarvetta vähentäviä lisäaineita.

Silika on ominaisuuksiensa puolesta hyvä seosaine, koska sen pieni raekoko ja korkea aktiivisuus parantaa betonin lujuutta, tiiviyyttä ja kemiallista kestävyyttä. Korkealujuusbetoneissa silikan käyttö kasvattaa jo suurta hienoaainesmäärää, jolloin se tekee betonimassasta kittimäistä, joka vaikuttaa massan työstettävyyteen. Väriominaisuuksiltaan silika tummentaa betonipintaa, joka tekee sävystä sinertävämmän. Lisäksi betonimassan hydrataatiolämpö vähenee sementtimäärän mu-

kaisesti, lisäaineiden annostus on tarkistettava erikseen silikan käytön yhteydessä. By Betoninormien 2016 mukaan silikan aktiivisuuskerroin on 2,0. Poikkeuksena rasisluokat XC2...XC4 ja XF, joissa arvo alenee 1,0 jos vesi-sementtisuhte ylittää arvon 0,45.

2.3.3 Lentotuhka

Kuten silika niin myös lentotuhka on pozzolaani. Lentotuhkaa erotetaan kivihiilen poltossa voimalaitoksessa syntyvistä savukaasuista. Lentotuhka toimii betonissa sekä sideaineena että kiviaineksena (raekoko 1...150 µm). Lentotuhka betonin seosaineena hidastaa varhaislujuudenkehitystä, mutta parantaa myöhäsiän lujuuksia. CE-merkitty ja standardin SFS-EN 450 vaatimukset täyttävä lentotuhka luetaan soveltuvaksi betonin seosaineena. Kiintotiheys lentotuhkalla on 2100...2500 kg/m³. Lentotuhka jaetaan A- ja B-luokkaan hiilipitoisuuden eli hehkutushäviön mukaan. Pakkasenkestävä betonin valmistukseen saa käyttää vain A-luokan lentotuhkaa.

By 65 Betoninormien 2016 mukaan lentotuhkan aktiivisuus sementtiin verrattuna useimmissa rasisluokissa on 0,40. Mikäli lentotuhkan suhte sementtiin on $\geq 0,33$ sitä ei lasketa enää sideaineeksi, vaan luetaan toimivaksi fillerinä. Betoninormien mukaan suurin sallittu lentotuhkan lisäys on 30 % ... 45 % sementtimäärästä. Lentotuhkaa seosaineena käytettäessä on tärkeää suorittaa ennakkokeet lisäaineiden kanssa, koska lisäaineiden normaali toiminta voi muuttua lentotuhkaa sisältävässä betonimassassa. Kylmät lämpötilat hidastavat merkittävästi lentotuhkan reaktiota betonissa, minkä vuoksi sen käyttöä talvibetonoinneissa ja lattiavaluissa ei suositella, koska sitoutuminen ja lujuuden kehitys hidastuvat huomattavasti. Betonimassan lämpökäsittely taas nopeuttaa lentotuhkan reaktiota. Lisäksi betonimassan huokostaminen vaikeutuu lentotuhkan hiilipitoisuuden vuoksi.

2.4 Lisäaineet

Lisäaineet ovat betonin seossuhteiden ja osa-aineiden valinnan ohella kolmas tapa säädellä betonin ominaisuuksia. Lisäaineilla on mahdollista vaikuttaa betonimassaan sekä kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Lähtökohtana lisäaineiden

käytöllä on saavuttaa parempaa betonin taloudellista kilpailukykyä ja lisäksi parantaa sen teknisiä ominaisuuksia. Tietyt betonimassat käyttökohteineen kuten pakkasenkestävä betoni ja korkealujuusbetonit ovat erittäin vaikeita valmistaa ilman lisäaineita, joten niiden vaikutus betonirakentamisessa on merkittävä onnistuneen lopputuloksen kannalta.

Lisäaineiden osalta on olemassa standardi SFS-EN 934-2 jonka mukaisten lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä. CE-merkinnän ulkopuoliset lisäaineet menevät standardin SFS-EN 934-1 alle, joka määrittelee yleiset vaatimukset. Lisäksi näistä tuotteista pitää olla esittää varmennustodistus tai kelpoisuus muulla hyväksytyllä menetelmällä.

2.4.1 Notkistimet

Erilaisten notkistimien tehtävä on parantaa betonin teknisiä ja taloudellisia ominaisuuksia. Ne jaetaan notkistimiin ja tehonotkistimiin tehokkuutensa perusteella. Määriteltyjen standardien mukaisesti vedenvähennyskyky tehonotkistimilla tulee olla 12 % ja notkistimilla 5 %. Notkistavat lisäaineet toimivat sementin ja veden välillä aktiivisina pinta-aineina. Lisäksi notkistimet vaikuttavat työstettävyyteen kuten pumpattavuuteen ja koossapysyvyyteen (By 201 2018, 62).

Notkistimien toiminta ja teho riippuvat sementin laadusta, hienoainesmäärästä ja sekoitustehokkuudesta. Notkistimien käytössä halkeiluriski pienenee ja muodonmuutosten hallinta betonin kovettumisen aikana helpottuu. Notkistimien mahdollistama alhaisempi vesi-sementtisuhde vähentää kuivumiskutistuman aiheuttamaa halkeilua. Lisäksi alhaisempi vesi-sementtisuhde parantaa betonin lujuutta, tiivyyttä ja kestävyttä. Pienempi vesimäärä myös pienentää betonin huokostilavuutta ja vähentää riskiä veden ja haitallisten aineiden pääsystä betonin sisään. Notkistimia käytettäessä on huomioitava riski betonimassan erottumiselle ja tiedostettava hydrotaatioreaktion hidastuminen etenkin viileissä olosuhteissa. Lisäksi halkeiluriski kasvaa pitkävaikutteisilla tehonotkistimilla, jolloin hienoainepitoisuus sekä kiviainesuhteutus on suunniteltava huolella.

2.4.2 Huokostimet

Huokostimia käytetään, kun betonin pakkasenkestävyyttä halutaan kasvattaa. Ne ovat myös pinta-aktiivisia aineita ja stabiloivat betonin sekoituksessa syntyvät ilmakuplat tasaisesti betoniin. (By 201 2018, 63) julkaisun mukaan normaalisti betonissa on ilmaa 1...2 % eli 10...20 dm^3/m^3 . Tiiviissä ja korkealujuuksissa betoneissa ilmaa voi olla alle prosentin. Lisähuokostus tulee kyseeseen, kun pakkasenkestävyyttä halutaan lisätä, jolloin ilmapitoisuus nostetaan 4...7 % lisäaineen avulla. Lisättyjen suojahuokosten on tarkoitus ottaa vastaan betonissa olevan veden jäätyminen aiheuttama paine ja säilyttää betoni ehjänä. Tärkeimpänä tekijänä suojahuokosten osalta on niiden sopiva koko (ominaispinta-ala $< 25 mm^2/m^3$) sekä välimatkaltaan riittävän lyhyt (huokosjako $\leq 0,23$ mm).

Huomioitavaa on, että huokostuksen lisätessä betonin muokattavuutta ja vähentäessä osa-aineiden erottumista, se myös heikentää hieman betonin lujuutta. Betonitiedon julkaisu lisäaineista (6) mukaan 1 % ilmamäärän lisäys heikentää arviolta noin 5 % betonin lujuutta. Lisäksi huokostimen ja notkistimen yhteensopivuus on testattava etukäteen, koska tietyt notkistimet sisältävät vaahdonestoaineita, jotka vaikuttavat huokostuksen onnistumiseen.

2.4.3 Hidastimet

Hidastimien tarkoitus on siirtää betonin sitoitumista myöhemmäksi, joka mahdollistaa pidemmät kuljetusmatkat, pienentää työsaumojen syntyä ja soveltuu lämpimiin olosuhteisiin. Hidastin ei alenna betonin maksimihydrataatiolämpötilaa, vaan viivästyttää vain sen saavuttamista. Normaaleilla annostuksilla ei merkittävästi hidasteta betonin kovettumista, mutta suuremmilla annostusmäärillä kovettuminen hidastuu ensimmäisten vuorokausien osalta. Tavanomaisesti hidastinta käytetään 0,2...2 % sideaineen määrästä. Merkittävimmät tekijät annostelun osalta ovat sementtilaatu, lämpötila ja haluttu vaikuttava viive.

2.4.4 Kiihdyttimet

Kiihdyttimiä käytetään betonin sitoutumisen ja kovettumisen nopeuttamiseen erityisesti silloin, kun tarvitaan nopea muotinpurkulujuus tai jäätymslujuus. Lisäksi sitä käytetään ruiskunbetonoinnissa, jossa kiihdyttimen tulee täyttää standardin SFS-EN 934-5 vaatimukset. Aiemmin kiihdyttimenä käytettiin paljon kalsiumklo-

ridia, joka nykyisin on kiellettyä terästen korroosiovaaran vuoksi. Yleisesti kiihdyttimien käyttö teräsbetonirakenteissa on vähentynyt, koska kiihdyttimien hyödyt on saatu tuotekehitysten myötä muista tuotteista. Helpommin lujituksenkehitystä kiihdyttäviä tuotteita ovat esimerkiksi nopea sementti, kuuma betoni ja suhteituk- sessa haettava alhaisempi vesi-sementtisuhde. Huomioitavaa on, että kiihdytti- met alentavat betonin loppulujuutta, joka tulee ottaa huomioon betonin suhteituk- sessa.

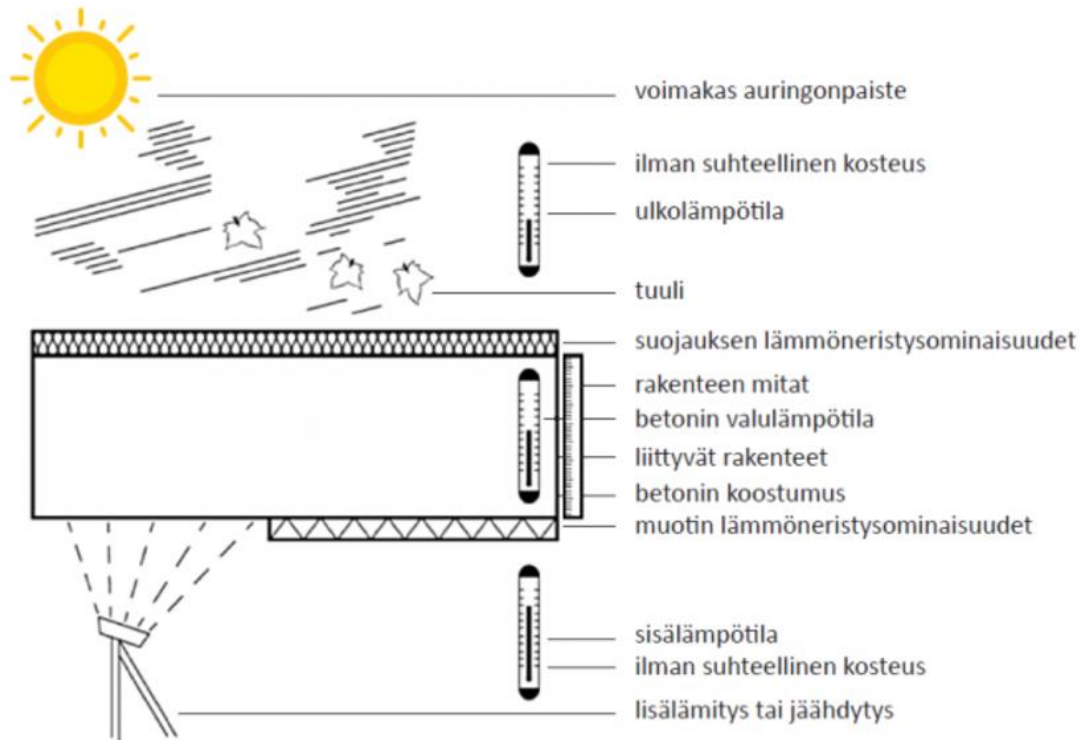
2.4.5 Muut lisäaineet

Betoniin käytettävillä muilla lisäaineilla on mahdollista parantaa jäätymisenkes- toa, pienentää kutistumaa, paisuttaa betonia tai esimerkiksi parantaa vesi tiiveyttä. Jäätymisenkesto pohjautuu betonissa olevan veden jäätymispisteen muuttamiseen. Jäätymisenkesto ei kuitenkaan tule käyttää vaativimmissa rasi- tusluokissa. Kutistuman pienentävää tai paisuttavia lisäaineita käytetään, kun ha- lutaan pienentää betonissa saumojen määrää tai pyrkiä tekemään niistä lähes saumattomia. Lisäksi niillä on mahdollista parantaa vesi tiiveyttä, koska hal- keamien syntymisen esto on yksi käytön syy. Vesi tiiveyttä on mahdollista paran- taa myös muilla lisäaineilla, jotka korjaavat tai tiivistävät halkeamia, jolloin beto- nimassaan lisättynä parantavat betonin tiiveyttä.

2.5 Betonirakenteen jälkihoito

Betonirakenteen jälkihoidolla tarkoitetaan betonoinnin ja pinnan tasauksen jäl- keen käynnistettäviä toimenpiteitä suunniteltujen ominaisuuksien saavuttamisen varmistukseksi. Tarkoituksena on luoda valetulle rakenteelle olosuhteet, jossa kovettuminen tapahtuu ilman häiriötä kohti suunniteltua loppulujuutta ja ominai- suuksia. Toimenpiteitä ovat esimerkiksi veden haihtumisen estäminen ja siten rakenteen pitäminen kosteana. Kovettumislämpötilasta huolehtiminen, eli lämpö- tilanvaihtelun minimointi. Lisäksi tarvittaessa jälkihoitoon kuuluu myös suojaami- nen auringolta, tuulelta, sateelta, kylmältä tai kuumalta. Jälkihoito jaetaan kah- teen tyyppiin suoritusajankohdan mukaan. Nämä tyypit ovat varhaisjälkihoito ja varsinainen jälkihoito.

Varhaisjälkihoitolla tarkoitetaan toimenpiteitä, jotka tehdään jo betonipinnan oikaisun yhteydessä. Varhaisjälkihoitoa tulee hyödyntää vaativissa olosuhteissa, jossa tilanne on epäedullinen betonin kovettumiselle esimerkiksi tuule, auringonpaisteen tai lämmön seurauksena. Toimenpiteenä on varhaisjälkihoitoaine, joka sumutetaan jo ennen betonipinnan viimeistä hiertoa. Varsinaisella jälkihoitolla jatketaan toimenpiteitä välittömästi valun jälkeen levitettävän jälkihoitoaineen avulla. Muut jälkihoitotoimenpiteet tulee työntoteuttajan suunnitella etukäteen sen pohjalta mitä toimenpiteitä valuolosuhteisiin nähden tarvitaan.



Kuva 4: Betonin lujuudenkehitykseen vaikuttavia tekijöitä, jotka tulee huomioida jälkihoitossa. BY201 (2018) s. 342

Kuvan 4 osoittaa selkeästi tekijät, jotka tulee ottaa huomioon jälkihoitoa suunniteltaessa. Betonirakennetta voi olla tarpeen suojata, pitää kosteana, turvata riittävä kosteus, peitellä tai kastella sekä kovettumislämpötilasta huolehtiminen. Lisäksi kesäolosuhteissa ja massiivirakenteiden kanssa lämpötilan kohoaminen liian korkeaksi on syytä pystyä hallitsemaan. Haastattelun vastauksissa J.Humalajoki mainitsee merkittäväksi tekijäksi rakenteen sisällä liian isojen lämpötilaerojen osalta jälkihoiton, peittelyn ja suojauksen onnistumisen merkityksen. Näillä toimenpiteillä betonirakenteiden halkeilua voidaan pääosassa tapauksia ehkäistä lämpötilaerojen osalta.

Betonin jälkihoitoluokat (SFS-EN 13670)

	Jälkihoitoluokka 1	Jälkihoitoluokka 2	Jälkihoitoluokka 3	Jälkihoitoluokka 4
Aika (h)	12*	Ei käytetä	Ei käytetä	Ei käytetä
Kovettumisaste prosentteina määritellystä 28 vrk:n ominaispuristuslujuudesta	Ei käytetä	35 %	50 %	70 %
* Edellyttäen, että sitoutuminen kestää korkeintaan 5 tuntia ja betonin pintalämpötila on vähintään + 5°C				

Taulukko 1: Betonin jälkihoitoluokat (SFS-EN 13670)

Betonirakenteen jälkihoitoaika määräytyy betonin kovettumisnopeuden ja kovettumisolosuhteiden kautta. Jälkihoidon kesto on merkittävä tekijä jälkihoidon onnistumisen kannalta, koska betonin kutistuminen alkaa välittömästi jälkihoidon lopetuksesta. Betonirakenteet jaetaan standardin SFS-EN 13670 (taulukko 1.) mukaisiin jälkihoitoluokkiin rasitusluokkien perusteella. Standardin mukaan rasitusluokkien X0 ja XC sovelletaan jälkihoitoluokkaa 3. Muiden kuin XF2 ja XF4 luokkien osalta käytetään jälkihoitoluokkaa 4. XF2 ja XF4 luokkien jälkihoitoa jatketaan, kunnes saavutetaan 80 % nimellislujudesta.

3 LAATUPOIKKEAMAT JA VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

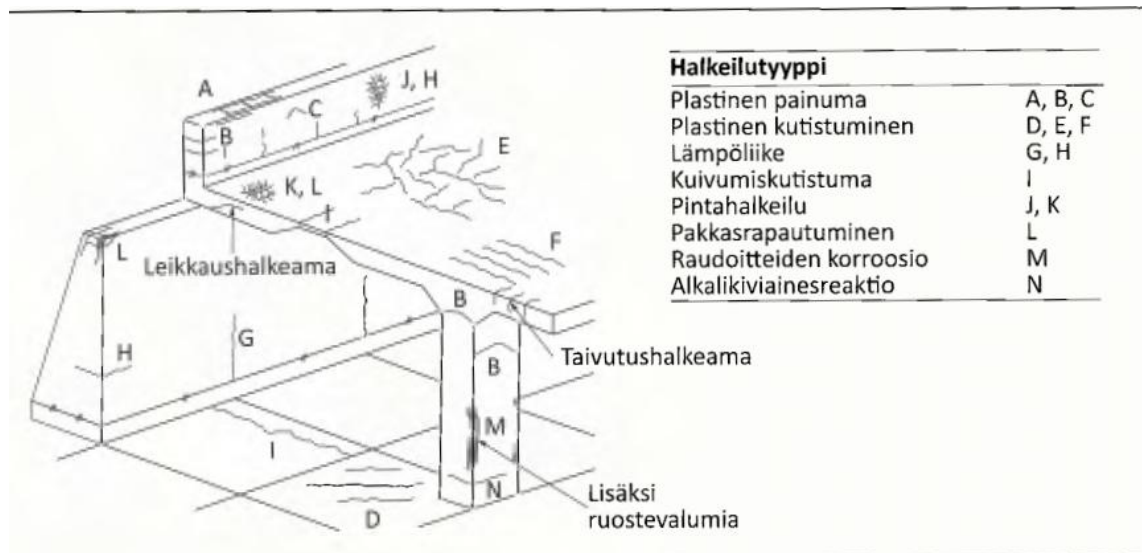
3.1 Halkeilu ja muodonmuutokset

Halkeilu on betonin ominaisuus, jota on mahdoton estää kokonaan. Se voi syntyä betoniin jokaisessa kovettumisen vaiheessa eli plastisessa tilassa, sitoutumis- ja kovettumisvaiheessa tai sen jälkeen. Halkeilua on mahdollista rajoittaa suunnitelmalla rakenne oikein sekä toteuttamalla se oikein. Betonirakenteiden halkeamista kaikki eivät ole rakenteellisesti haitallisia eivätkä tällöin vaikuta rakenteen toiminnallisuuteen tai elinkaareen. Muodostuvat halkeamat on syytä tunnistaa rakenteen staattisen toiminnan, säilyvyyden sekä ulkonäön kannalta. Lisäksi halkeamaleveyden ja halkeilun tulee olla sallittua, jotta mahdollisiin jatkotoimenpiteisiin voidaan tarvittaessa ryhtyä. Betonirakenteiden halkeilun hallitsemiseksi on tehtävä erilaisia ratkaisuja niin suunnittelijan, kuin urakoitsijan toteutuksen osalta, jolloin eri halkeilu ja muodonmuutos tyyppien tunteminen välttämätöntä.

Halkeama muodostuu, kun betonin vetolujuus ylittyy. Halkeamat lisäävät merkittävästi betonin läpäisevyyttä, jolloin säilyvyys ominaisuudet heikkenevät. Halkeamista haitalliset aineet pääsevät tunkeutumaan betoniin. Betoni suojaa raudoitusta kemiallisilta ja fysikaalisilta haitoilta, ja kun halkeamasta haitalliset aineet kuten kloridit, sulfaatit ja erilaiset liuokset pääsevät sisään betoniin, heikentyy sen suojaava vaikutus. Halkeamista haitallisimpia ovat 0,2...0,4 mm kokoiset halkeamat, jotka ylettyvät raudoitukseen asti. Lisäksi raudoituksen suuntaiset halkeamat voivat aiheuttaa raudoituksen korroosiota hyvin laajalla alueella. Halkeamat pyritäänkin rajaamaan suunnitteluvaiheessa olosuhteiden mukaan 0,1...0,3 mm kokoisiksi. Halkeilua ilmenee betonissa pian valun jälkeen tai vasta vuosienkin päästä. Halkeiluun vaikuttaa lämpötilaerot, kuivumiskutistuma, kemialliset reaktiot, tulipalo sekä raudoitteiden korrosio. Lisäksi muodonmuutoksia voi esiintyä jo ennen betonin sitoutumista tai halkeilun syynä voi olla huono työsuoritus tai kantavuuden ylittävä kuorma.

Yleisimmiksi betonirakentamisen parissa kohtaamukseen laatupoikkeamiksi haastattelussa Jari Humalajoki nimesi halkeamat, harvavalut, rakkulat ja muotovirheet. Haastatteluiden osalta selvisi myös, milloin työntoteuttaja huomaa laatu-

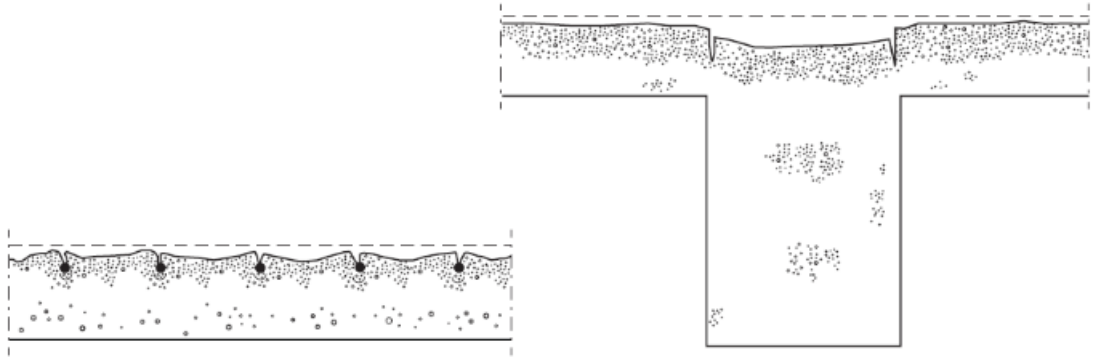
poikkeamat. J.Humalajoen vastausten mukaan halkeamat havaitaan pääosin hyvin nopeasti valun jälkeen, etenkin ne, jotka eivät ole muottien sisässä. Betonipinnan hierron jälkeen on havaittavissa siltojen kansien nystermät, painumat ja purseet. Muottien sisässä olevat laatuvirheet paljastuvat luonnollisesti muottien purun jälkeen sekä muotovirheet viimeistään tarkemittauksilla. Oheinen kuva 5 käsittelee ja selventää yleisimpiä halkeilutyyppejä, joita käsitellään seuraavaksi.



Kuva 5: Halkeilutyyppit ja yleinen esiintymä rakenteessa BY67 (2016) s.30

3.1.1 Plastinen painuma

Plastinen painuma on ennen betonin sitoutumista tapahtuvaa pystysuuntaista kutistumista, joka aiheuttaa halkeilua. Kyseinen kutistuma johtuu tiivistetystä betonimassasta poistuvan veden seurauksena. Vettä voi poistua tiivistetystä betonimassasta erottumisen tai haihtumisen seurauksena, jolloin betonin tilavuus pienenee ja plastinen painuma tapahtuu. BY67 (2016) mukaan plastisen painuman suhteellinen arvo voi olla jopa 1 % ja halkeamat rakenteen pinnassa useiden millimetrien levyisiä, jotka sulkeutuvat nopeasti syvemmälle rakenteeseen mentäessä.



Kuva 6: Plastinen painuma ja sen aiheuttamia halkeamia laatussa sekä laatan ja palkin liittymäkohdassa BY201 (2018) s. 76

Erottuessaan betonimassan vesi pyrkii kevyenä ylöspäin samalla kun painavammat sementti ja kiviaines pyrkivät alaspäin muotissa. Lisäksi vesi pyrkii nousemaan ylöspäin muottien rajapintoja pitkin tai valuu ulos muotin rakojen kautta. Mikäli tällainen tilavuuden muutos on estetty betonirakenteessa esimerkiksi poikkileikkauksessa olevien epäjatkuvuuskohtien, muottisiteiden, raudoitustankojen tai kitkan takia voi kriittisiin kohtiin muodostua halkeama plastisesta painumasta.

3.1.2 Plastinen kutistuminen

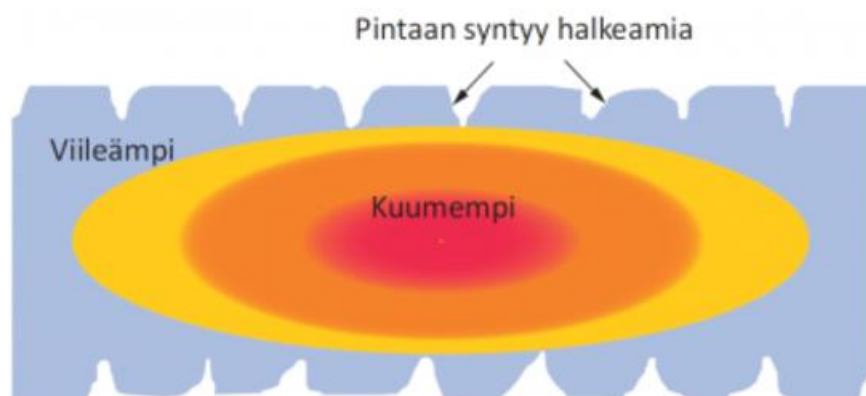
Plastinen kutistuminen on vaakatasossa tapahtuvaa betonimassan kutistumista, joka tapahtuu valusta muutaman tunnin sisällä. Liian nopea betonipinnan kuivuminen johtuu plastisen painuman tavoin veden erottumisesta ja/tai haihtumisesta. Erottuminen on vaakatasossa myös mahdollista, mutta huomioitavaa on, että vaakarakenteet ovat herkempiä veden haihtumiselle esimerkiksi valuolosuhteiden kuten auringonpaisteen, lämpötilan tai tuulen takia. Erityisen herkkiä plastiselle kutistumalle ja sen aiheuttamalle halkeilulle ovat maanvaraiset tai kantavat laatat ja ohuet jälkivalut.

Betonipinnan kuivuessa ja veden haihtuessa syntyy pinnan lähellä olevien pienten hiukkasten välille kaarevia vesipintoja. Veden pintajännityksen sekä hiukkasten ja veden välisen vetovoiman vaikutuksesta pintaan syntyy kalvojännitystila, joka aiheuttaa vetovoimaa, jolloin betonimassa kutistuu. Syvemmältä betonimas-

sasta nouseva vesi nousee samalla kapillaarihuokosiin muodostuneen alipainen seurauksena. Betonin tilavuuden pieneneminen on yhtä suurta haihtuvan vesimäärän kanssa niin kauan, kun kiviainesrakeet ja sementtihiukkaset pystyvät liikkumaan alaspäin, täyttäen haihtuvasta vedestä tyhjäksi jääneen tilan. Kun vastaavaa liikkumista ei kitkan kasvusta pääse tapahtumaan, muodostavat kalvovoimat vetovoimista betonin pintaan vetojännityksiä, joka aiheuttaa halkeamia.

3.1.3 Lämpöliike ja lämpötilaerot

Lämpöliikkeellä tarkoitetaan betonirakenteessa tapahtuvaa laajentumista tai kutistumista, joka johtuu ympäristön ja rakenteeseen vaikuttavasta lämpötilasta. Betonirakenteen eri osien lämpötila erot aiheuttavat jännityksiä, kun vetojännitys kasvaa betonin vetolujuutta suuremmaksi, syntyy halkeama. Sementin hydrataatio tuottaa lämpöä, joka poistuu betonin pinnan kautta ja muodostaa lämpötilaeron rakenteen pinnan ja ytimen välillä. Lämpötilaerot rakenteen osien välillä (kuva 7) korostuvat etenkin massiivirakenteissa ja talvivaluissa. Talvivaluissa aikainen muottien purkaminen tai lämpökäsittelyn jälkeen, voi pinnan lämpötila laskea liian nopeasti ja halkeama syntyy.



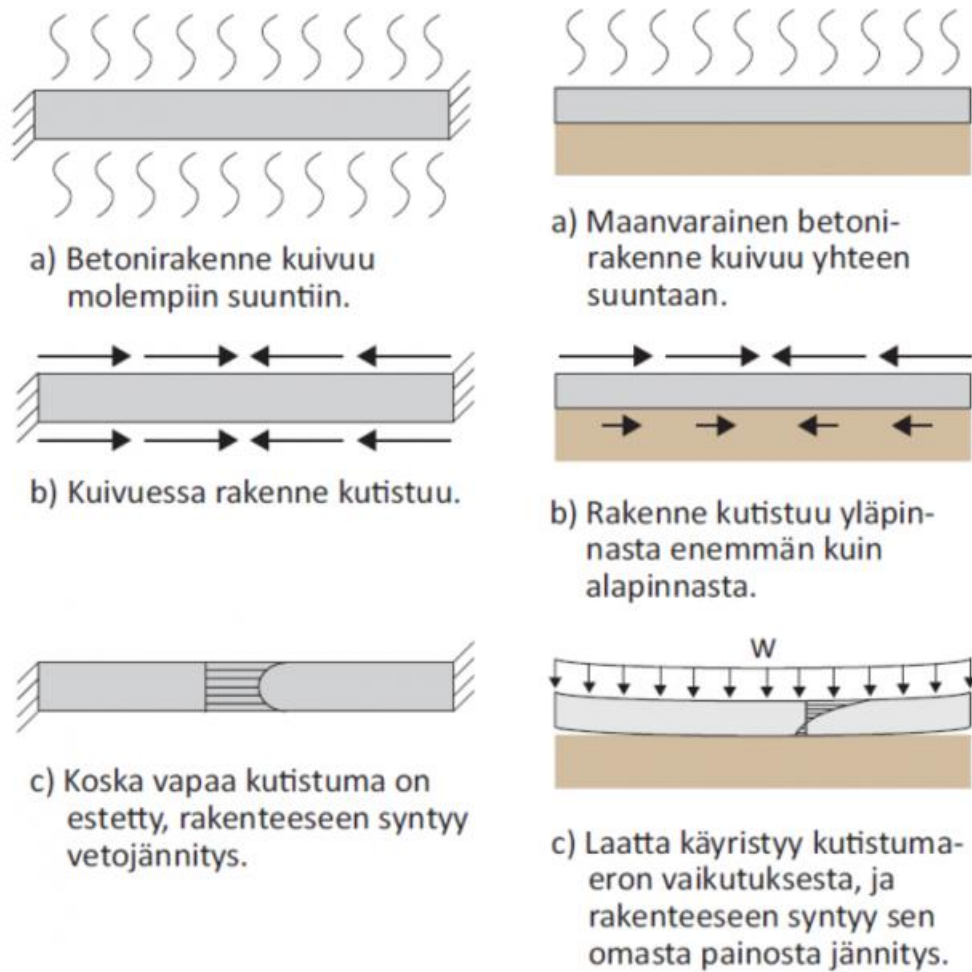
Kuva 7: Sisä- ja ulkopinnan lämpötilaerot voivat johtaa halkeamia aiheuttaviin jännityksiin BY201 (2018) s.105

Lämpöliikkeestä aiheutuvat betonin kovettumisvaiheen halkeamat ovat pääosin verkkomaisia pintahalkeamia ja suuruudeltaan muutamasta millimetristä muutama senttimetriin. Huomioitavaa on, että estetyn muodonmuutoksen tilanteissa lämpöjännityksestä aiheutuvat halkeamat menevät laattarakenteiden läpi. Lisäksi

rakenneosien liittymäkohdissa halkeamat voivat ylettyä myöhemmin valetun rakenneosan läpi. Estettyä muodonmuutosta voidaan ehkäistä esimerkiksi liikunta saumalla, joka ehkäisee suurten pakkovoimien muodostumista rakenteeseen sekä antaa rakenteelle tilaa lämpöliikkeeseen. Etenkin pitkät ja massiiviset rakenteet kokevat merkittäviä pituuden ja tilavuuden muutoksia lämpötilanvaihtelusta, jolloin esimerkiksi liikuntasauva on välttämätön.

3.1.4 Kuivumiskutistuma

Kuivumiskutistumalla tarkoitetaan betonirakenteessa tapahtuvaa kutistumaa sen myöhemmällä iällä. Kuivumiskutistuma kovettuneessa betonissa johtuu veden poistumisesta ja siitä johtuvasta tilavuuden muutoksesta eli kutistumasta. Kutistuman suuruus on suoraan verrannollinen betonirakenteesta poistuvan veden määrään. Poistuva kosteus on kosteutta, joka ei sitoudu betoniin kemiallisesti eikä jää pysyvästi betonin pienimpiin huokosiin. Massiivisten rakenteiden osalta kosteus poistuu aina ensin pintakerroksesta ja viimeiseksi rakenteen sisäosista, on myös mahdollista, että kosteus ei poistu sisäosista koskaan. Kuvan 8 mukaisesti betonirakenteen kuivumiskutistumaan vaikuttaa eniten haihtuminen ja sen eri mahdollisuudet, jolloin jännityksiä on mahdollista syntyä.

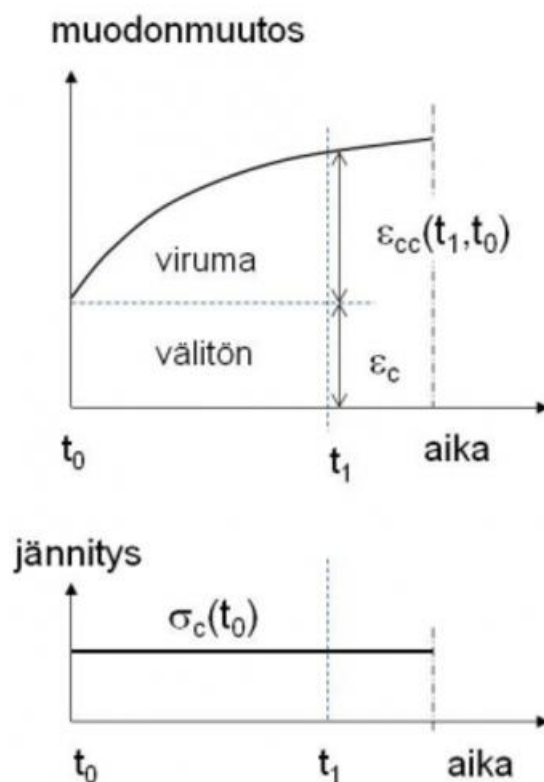


Kuva 8: Periaatekuva betonin kuivumiskutistuman aiheuttamista jännityksistä välipohjan laatussa ja maanvaraisessa laatussa. BY201 (2018) s. 106

Betoni kuivuu hitaasti, jolloin kuivumiskutistuman muodostamia halkeamia syntyy pitkän ajan kuluessa. Mitä suurempi määrä betonimassassa on kiviainesta, sitä vähemmän kutistumaa tapahtuu. Lisäksi vesimäärän vähentäminen pienentää kuivumiskutistumaa. Kuivumiskutistuman synnyttämät halkeamat ovat yleensä verkkomaisia ja ne syntyvät rakenteen pintaan. Halkeilu on hyvin samantapaista, kuin kovettumisvaiheen lämpötilaerojen halkeilu ja siten ne ovat haasteellisia erottaa toisistaan. Huomioitavaa on, että kuivumiskutistuminen aiheuttaa halkeamia myös, jos toisissaan kiinni olevat rakenneosat kutistuvat eri vauhtia tai niiden loppukutistumat ovat eri suuruiset. (BY201, 2018 s.16)

3.1.5 Betoninrakenteen viruma

Betonin virumalla tarkoitetaan muodonmuutosta, joka tapahtuu kuormitetussa betonissa ajan kuluessa. Muodonmuutos kasvaa rakenteessa ajan myötä vakion kuormituksen alaisena. Viruma käynnistyy, kun rakenteen kuormitus alkaa ja voi jatkua vuosikymmeniä, kuitenkin nopeuden hidastuessa mitä pidempään aikaa kuluu. Viruma vaikuttaa erityisesti jatkuvasti kuormille alttiissa rakenteissa, kuten palkit, pilarit ja holvit. Jari Humalajoen (haastattelu, 22.11.2024) mukaan betoni-rakenne viruu aina, joka tulee ottaa huomioon esimerkiksi ennakkokokohotuksin suunnittelussa, jolloin rakenteeseen ei tule niin sanottua notkoa. Lähtökohtaisesti viruma on haitallinen ilmiö, koska se lisää rakenteen muodonmuutoksia. Viruma voi kuitenkin tietyissä tapauksissa (vetoviruma) olla positiivinen tekijä vähentäen halkeilua, pienentäen jännityshuippuja ja/tai parantaen kestävyyttä.



Kuva 9: Viruma (ϵ_{cc}) muodonmuutoksena kuvattu ajan funktiona BY201 (2018) s. 95

Kuva 9 havainnollistaa kuinka betonirakenteen kokonaismuodonmuutos koostuu vakion kuormituksen alaisena. Kuvan 9 kuvaajat erittelevät välittömän elastisen muodonmuutoksen ja viruman, joka kasvaa ajan myötä, mutta hidastuu pitkällä aikavälillä. Betoniteknikan oppikirjan (2018 s.95) mukaan virumista selitetään

sillä, että kuormituksesta muodostuvan paineen takia geelihuokosissa oleva vesi virtaa niistä pois ja samalla sementtigeeli tiivistyy. Muita syitä ovat kosteuden haihtuminen, kuormituksen jännitystaso ja kesto.

BY201 (2018) mukaan rakenteissa viruma ilmenee hiljalleen lisääntyvänä taipumana. Taipuma voi kasvaa muutaman kymmenen vuoden aikana 2...3-kertaiseksi välittömään kimmoisaan muodonmuutokseen verrattuna. Suunnittelijan on huomioitava käyttötilan vaatimukset kuten halutun jännevälin säilyminen mahdollisen virumasta johtuvan painuman tai taipuman osalta. Betonirakennetta on kuormitettava vaiheittain, jolloin viruman vaikutus jää mahdollisimman pieneksi. Viruman suuruuteen vaikuttavat lisäksi rakenteen mitat, betonin ikä kuormitushetkellä ja betonin lujuusluokka. Viruma toimii kutistuman kanssa usein rakenteessa samanaikaisesti, koska samat betonin sisäiset ominaisuudet, jotka vaikuttavat kutistumaan vaikuttavat myös viruman suuruuteen.

3.1.6 Pakkasrapautuminen

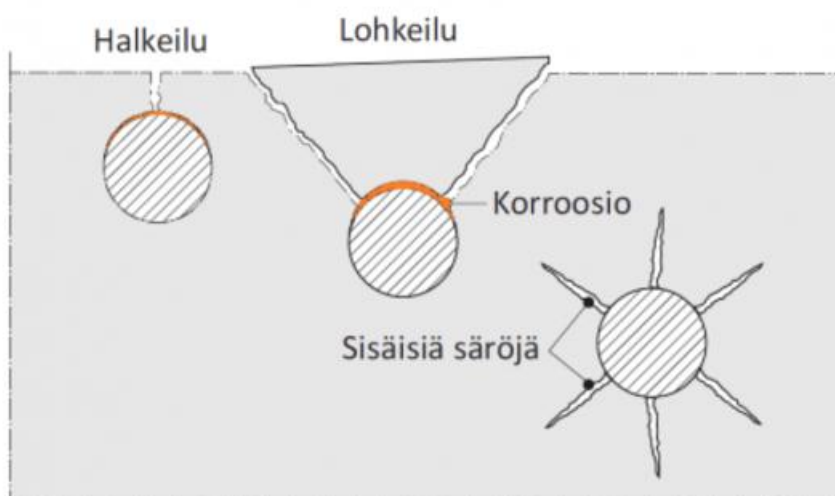
Betonirakenteen pakkasrapautumista aiheuttaa pääasiassa betonin kapillaarihuokosissa oleva vapaa vesi. Vapaan veden jäätymlaajeneminen aiheuttaa ylipainetta huokosverkostoon, joka kasvaa edelleen jääkiteen tilavuuden kasvusta lämpötilan noustessa. Tämä betonin sisään muodostunut ylipaine saa aikaan rakenteen sisäisiä säröjä ja halkeamia. Lähtökohtana siis on, että betonirakenne vaurioituu, mikäli veden jäätymisestä johtuva tilavuudenkasvu ei pääse tapahtumaan vapaasti. Lisäksi betonin huokosissa olevan jään kiteytymispaineen ylittäessä sementtikiven vetolujuuden syntyy betoniin vaurio. Pakkasvaurion voi aiheuttaa myös sementtikiven ja kiviaineksen erisuuruinen lämpölaajeneminen.

Pakkasrapautuminen ilmenee betonirakenteessa BY201 (2018) mukaan lujuuden menetyksenä, tilavuuden kasvuna, läpäisevyyden lisääntymisenä tai pinnan rapautumisena eli halkeiluna tai lohkeamisena. Suomessa ja sää olosuhteissamme pakkasrapautuminen ja pakkassuolarapautuminen ovat merkittäviä ilmiöitä betonirakenteissa. Pakkasrasituksia betonirakenteissa lisäävät myös merivedessä oleva suola sekä talvella käytettävät tiesuolat. Kloridisuolat heikentävät betonin pakkasenkestävyyttä myös vaikuttamalla kemiallisesti sementtikiveen.

3.1.7 Raudoitteiden korroosio

Raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen reaktio, joka tapahtuu joko anodi- tai katodireaktion kautta. Kun betonin kemiallinen tai fysikaalinen suojavaikutus heikkenee, muodostuu korroosiosolu, jossa tapahtuu pääreaktioina anodi- ja katodireaktiot. Reaktiot yhdessä muodostavat ruostetta, jonka tilavuus on alkupe- räisen raudan tilavuutta huomattavasti suurempi, tällöin betonirakenne halkeilee ja synnyttää rakenteellisia vaurioita. Korroosio etenee, mikäli betonirakenne py- syy kosteana ja happi pääsee raudoitteen pinnalle.

Korroosiovaara on siis pieni, kun betoni on vedenalla ja hapen kulkeutuma pientä tai rakenteen sijaitessa sisätiloissa (ilman suhteellinen kosteus alle 80 %). Suu- rimmillään korroosiovaara on, kun suhteellinen kosteus ilmassa on 95 % tai kun betonirakenne vuoroin kastuu ja kuivuu, esimerkiksi rakenteet, jotka ovat lähellä vesirajaa. Halkeamien kohdalla raudoituksen korroosio alkaa huomattavasti no- peammin, kuin muualla rakenteessa. Nopeuteen vaikuttaa halkeaman koko sillä kloridien tunkeutuminen isommissa halkeamissa on erittäin nopeaa. Pienien hal- keamien (<0,3 mm) osalta korroosio ei BY201 (2018) s. 110 mukaan juuri li- säännny, koska korroosiotuotteet sekä betonista liukenevat aineet täyttävät hal- keaman. Lisäksi korroosiolle välttämätön happi etenee hitaasti betonipeitteen läpi. Betonipeitepaksuus on siis merkittävämpi tekijä korroosionopeudessa, kuin esimerkiksi pienet halkeamat.



Kuva 10: Raudoituksen korroosiossa syntyvien korroosiotuotteiden tilantarpeen aiheuttamaa be- tonin halkaisevaa voimaa kuvattuna. BY201 (2018) s. 111

Korroosion reaktiotuotteiden vaatima tilantarve muodostaa betonirakenteessa halkaisevan voiman, sillä tuotteiden vaatima tilavuus on nelinkertainen alkuperäiseen raudoitukseen nähden. Halkaiseva voima synnyttää halkeamia, sisäisiä säröjä ja lohkeamia. Lisäksi korrosio voidaan huomata betonipinnan värjäytymisenä reaktiotuotteista. Näitä korroosion aiheuttamia reaktioita on kuvattuna kuvassa 10.

Raudoituksen poikkileikkaus pienenee korroosion vaikutuksesta, joka voi vaikuttaa rakenteen kapasiteettiin. Korroosion synnyttämät raudoitustankojen suuntaiset halkeamat voivat johtaa ankkuroinnin pettämiseen raudoituksen ja betonin välillä. Merkittävin ja kriittisin korrosio syntyy raudoitukseen, kun se on samanaikaisesti vetojännityksen ja korroosiota aiheuttavien tekijöiden vaikutuksen alaisena. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi jännitettyjen rakenteiden jänneraudat, joihin kohdistuu jännityskorroosiota sekä vetyhaurautta. Ne muodostuvat jännerautoihin kemiallisten reaktioiden kautta samalla, kun jänneraudat ovat vetojännitettyinä, jolloin korrosio etenee nopeasti. Jännitettyjen rakenteiden jänneraudat tulee olla niin hyvin suojattu korroosiolta, että ne eivät menetä edes paikallisesti passiivisuuttaan (BY201, 2018 s.111).

3.1.8 Alkalikiviainesreaktio

Alkalikiviainesreaktio on betonissa tapahtuva paisuntareaktio, jossa silikaatti- tai karbonaattipitoiset kiviaineet reagoivat betonissa olevien alkalihydroksidien kanssa. Alkalikiviainesreaktio vaatii kolmen seuraavan tekijän täyttyvän, jotta reaktio on mahdollinen, sementti sisältää runsaasti alkaleja, kiviaineksessa on alkalisuutta heikosti kestäviä mineraaleja ja betonin kosteuspitoisuus on riittävän korkea. Alkalikiviainesreaktio jaetaan kolmeen eri tyyppiin, jotka ovat alkali-silikaatti-, alkali-piihappo- ja alkalikarbonaattireaktio. Yleisin näistä on alkali-silikaattireaktio, jossa huokosveden alkalit vaikuttavat osaan betonin kiviaineksen silikaattisista yhdisteistä. Reaktio muodostaa alkali-silikaattigeeliä ja mikäli betonissa on riittävästi kosteutta, paisuttaa se syntynyttä geeliä. Tämä reaktio saa aikaan betonin paisumisen, pinnan kuivumisen sekä rapautumisen. Halkeilua ja paisumista aiheuttavat myös vähemmän yleiset alkali-piihappo- ja alkalikarbonaattireaktiot.



Kuva 11: Alkalikiviainesreaktiota (Risto Mannonen, Betonitieto)

Alkalikiviainesreaktio muodostaa betonirakenteeseen reaktion seurauksena tiheää verkkohalkeilua rakenteen pintaan sekä betonipinta on laikukas. Halkeamat voivat päästää ulos geelimäistä reaktiotuotetta. Halkeamien leveyden, pituuden ja syvyyden osalta ei ole tarkkaa vakio mitta, vaan mittasuureet niiden osalta vaihtelevat alkalikiviainesreaktion seurauksena paljon.

BY67 2016 mukaan Suomessa käytettävien tiiviiden syväkivilajien osalta alkali-reaktiot ovat melko harvinaisia. Nämä kivilajit ovat kemiallisesti hyvin kestäviä, jonka takia reaktiota ei esiinny niin laajasti. Reaktiivisuus kiviaineen osalta voidaan selvittää mineralogisilla tutkimuksilla, eikä alkalireaktiivista kiviainesta tule käyttää betonin valmistukseen ollenkaan. J.Humalajoki mainitsi haastattelussa alkalikiviainesreaktion välttämiseksi parhaimman keinon olevan rakenteen tekeminen laadullisesti hyväksi, jolloin tältä ongelmalta on mahdollisuus välttyä rakenteessa.

3.2 Suunnitteluratkaisujen merkitys

Rakennesuunnittelun lähtökohtana on suunnitella ja analysoida tietty rakennemalli siten, että halkeilu on mahdollista hallita ja minimoida kohtuullisin kustannuksin. Suunnitteluun kuuluu esimerkiksi kutistumasta johtuvien muodonmuutosten ennakointi ja tarvittavien kutistumis- ja liikuntasauvojen suunnittelu pakkovoimien hallitsemiseksi. Normien ja standardien avulla halkeamaleveyttä on rajoitettu. Eurokoodeissa SFS-EN 1992-1-1 esitetään kantaville rakenteille sallitut halkeama leveydet. Yleisissä kantavissa rakenteissa halkeamaleveys on rajoitettu $\leq 0,3$ mm, jolloin on mahdollista turvata rakenteen säilyvyys ja aiemmin määritelty käyttöikä.

Laadukkaan ja toimivan betonirakenteen takaamiseksi ovat suunnitteluratkaisut ja -valinnat merkittävässä roolissa kuivumiskutistumasta johtuvan halkeilun rajoittamisessa. Pääosin suunnittelija pystyy poistamaan syitä tai rajoittamaan seurauksia, jotka johtavat kutistumahalkeiluun. Toimenpiteitä syiden poistamiseen on pakkovoimien vähentäminen sekä kutistumisen pienentäminen. Seurausten rajoittamista ovat esimerkiksi raudoituksen suunnittelu sekä kutistumissaumat. Taulukossa 2 on esitetty erilaisia mahdollisuuksia halkeilun rajoittamiseen rakennesuunnittelijan näkökulmasta.

Toimenpide	Toimenpiteen osa-alueet	Tärkeimmät vaikuttavat tekijät	Suunnittelijan mahdolliset toimenpiteet
Kutistuman vähentäminen	Plastinen kutistuma	Betonin kuivuminen ennen sitoutumista, ulkoiset olosuhteet (tuuli, lämpötila).	Pääosin työnsuorituksen riippuvainen, välttä alhaisimpia vesi-sementtisuhteita erityisesti ohuissa rakenteissa.
	Autogeeninen kutistuma	Betonin vesi-sementtisuhte.	Välttä alhaisia vesi-sementtisuhteita (< 0,45).
	Kuivumiskutistuma	Betonin vesi- ja sementtimäärä.	Välttä korkeimpia lujuusluokkia erityisesti pakkasenkestävissä betoneissa.
Pakkovoimien vähentäminen	Rakenteiden estetty liikkuminen	Muut rakenteet eivät salli kutistuman aiheuttamia liikkeitä. Alustan ja lattian välinen kitka.	Varmista, että kutistuman aiheuttamat muodonmuutokset voivat tapahtua.
	Epätasainen kutistuminen	Kutistumaerot rakenteen pinnan ja keski-osan välillä. Kutistumaero uuden ja vanhan rakenteen välillä.	Kutistumaeroja voidaan vähentää hyvällä jälkihoidolla sekä hallitulla rakenteen kuivattamisella.
	Lämpötilaeroista johtuvat muodonmuutokset	Massiivisen rakenteen lämpötilaerot sekä lämpiämisen että jäähtymisen aikana.	Lämmöntuoton rajoittaminen seosementillä tai seosaineilla. Käytä tarvittaessa 91 d arvosteluikää.
Halkeama-levyyden rajoittaminen	Kutistumasaumot	Muodonmuutosten ohjaaminen haluttuihin kohtiin.	Suunnittele kutistumasaumot ja rauditus yhdessä.
	Rauditus	Halkeamien jakautuminen pienemmiksi.	

Taulukko 2: Toimenpiteitä halkeilun hallintaan rakennesuunnittelijan näkökulmasta (BY67 2016 s.42)

Taulukosta on tulkittavissa rakennesuunnittelijan merkittävimmiksi toimenpiteiksi kuivumiskutistumasta aiheutuvan halkeilun vähentämiseen oikeanlaisen betonimassan suunnittelun. Alhaisen vesi-sementti suhteen (< 0,45) sekä pakkasenkestävissä betoneissa korkeampien lujuusluokkien välttämisen. Oikeanlaisen betonilaadun eli vähän kutistuvan betonin avulla vähennetään halkeiluerkkyyttä. Lisäksi betonimassaan liittyen erilaisten seos- ja lisäaineiden käytön suhteen on huomioitava mahdolliset seuraukset ja rakenteen muodonmuutosten sekä halkeilun osalta asetetut raja-arvot. Huomioitavaa myös suunnittelijan kannalta on betonin vetolujuuden merkitys. Betonin vetolujuuden kehitys on tärkeää, koska kun

jälkihoito lopetetaan, käynnistyy kuivumiskutistuminen ja tässä vaiheessa betonin tulee kestää siitä aiheutuvia vetojännityksiä.

Pakkovoimien vähentämisen osalta merkittävimmät toimenpiteet ovat muodonmuutosten salliminen sekä lämmöntuoton rajoittaminen betonimassaan lisättävin seossementein tai seosaineiden avulla. Halkeama leveyden rajoittamisen osalta suunnittelijan on mahdollista suunnitella kutistumasaumot ja rauditus yhdessä, jolloin ne rajoittavat yhteistoiminnallaan halkeilua. Rakennesuunnittelun näkökulmasta muita huomioitavia tekijöitä ovat viruman ja kutistuman yhteisvaikutuksen huomioiminen. Lisäksi rakennesuunnittelussa tulee ottaa huomioon tietyissä määrin työntoteutuksen mahdollisuus ajatellen betonirakenteen toteutusta ja jälkihoito olosuhteita.

Haastatteluvastauksissa (22.11.2024) merkittävimmäksi tekijöiksi halkeilun ja muodonmuutosten estämiseksi nousi ennakkokokohotukset, laakeroinnit ja liikuntasaumat. J.Humalajoen mukaan näiden avulla rakenteesta saadaan halutunlainen, koska muodonmuutoksia ja halkeilua tapahtuu betonirakenteessa aina. Lisäksi esiin nousi raudituksen suunnittelun osalta eri ongelmakohtat, joihin olisi syytä kiinnittää enemmän huomiota. Tällaisia ongelmakohtia, joita olen kohdannut ovat raudituksen riittämättömyys kulmien ja/tai aukkojen läheisyydessä, puutteellinen kutistumaraudoitus tai kutistumis- ja liikuntasaumojen toteutus väärään paikkaan rakenteessa muodostuvia voimia ajatellen.

3.3 Työntoteutuksen merkitys

Betonityön työsuoritteiden toteuttaa lähtökohtaisesti urakoitsija, jolla on vaadittu pätevyys toteuttaa työ. Betonityösuoritusta johtaa ja siitä vastaa pätevyysiltään kelvollinen betonityönjohtaja. Betonityösuoritus jaetaan rauditus-, muotti- ja betonointitöihin. Valmiin ja onnistuneen rakenteen toteutus vaatii suunnitelmien, työsuunnitelmien ja työsuorituksen yhteensovittamista, huomioiden rakentamisaikaiset sekä käytönaikaiset olosuhteet.

Laadukkaan ja onnistuneen betonirakenteen muodonmuutosten ja halkeilun rajoittamiseksi urakoitsija laatii betonityösuunnitelman. Koska kutistumista ja halkeilua vähentävät tekijät riippuvat monista tekijöistä ja on otettava huomioon

työntoteutusta suunniteltaessa. Kun urakoitsija työntoteutuksen suunnittelussa ottaa huomioon kaikki halkeilua vähentävä tekijät pienenee halkeiluriski rakenteessa. Vaativissa betonointi olosuhteissa ja kohteissa laaditaan erillinen jälkihoitosuunnitelma, jolloin varmistetaan laadun osalta kaikkien mahdollisten tekijöiden huomioimisesta. Lisäksi betonointityö- ja jälkihoitosuunnitelman avulla betonityönjohtajan on käytännöllistä saattaa erilaiset toimenpiteet myös perehtyneen betonointiryhmän tietoon.

Työntoteutuksen osalta on useita merkittäviä tekijöitä, jotka tulee ottaa huomioon onnistuneen rakenteen toteutuksessa, jälkihoidon lisäksi. Betonointiin osallistuvan työryhmän on tärkeää ymmärtää eri toimenpiteet ja mahdolliset riskit. Lisäksi betonimassan valinta, massan siirtotekniikka muottiin sekä tiivistystekniikka ovat merkittävimmät onnistumista vaativat tekijät, jotka suunnitellaan ennen varsinaista betonointia. Betonimassan valinnan osalta haastattelussa J.Humalajoki nosti kokemuksellaan esiin nähneensä usein raekooltaan pienempää kiviainesta, kuin olisi mahdollista raudoituksen ja rakenteen osalta. Kuten raekokoä käsiteltäessäkin niin voidaan todeta, että mahdollisimman suuri raekoko betonimassassa vähentää omalta osaltaan halkeamia.

Haastatteluvastauksissa (22.11.2024) J.Humalajoki toi esiin Helsingissä Kruunusillat -hankkeella käytettävän betonimassan sisältävän paljon kuonaa. Kuona tekee massasta urakoitsijalle haasteellista valaa, koska se ei tiivisty normaalisti betonivibraattorilla. Tiivistymisen alettua massa olomuotonsa kautta on tiivistynyt liikaa ja lähtee helposti erottumaan. Erotumisesta seuraa aiemmin käsitellyllä tavalla halkeamia rakenteen yläpintoihin. Haastattelussa (22.11.2024) J.Humalajoki toi esille betonipinnan oikaisun ja hierron jälkeen havaittavat laatupoikkeamat eli nystermät, painumat ja purseet. Lisäksi muita mainittuja poikkeamia kuten rakulat ja harvavalut. Näiden poikkeamien osalta urakoitsijan tulee huolehtia betonointiryhmän ammattitaidosta sekä siitä, että ryhmä tiedostaa tarvittavat toimenpiteet ja oikean ajan niille, jotta rakenne saadaan valmistettua laadukkaasti mutta taloudellisesti.

4 BETONIRAKENTEIDEN KORJAUSTOIMENPITEET

Korjaustoimenpiteillä tässä opinnäytetyössä tarkoitetaan kokonaisuudessaan korjausperiaatteita ja -tapoja. Betonirakenteiden korjaamista säätelee monet määräykset, ohjeet sekä standardit. Lähtökohtana korjaustyössä on näiden asetusten noudattaminen sekä hyvän rakentamistavan noudattaminen ja yleisten tunnettujen työmenetelmien käyttäminen. On kuitenkin korjaustoimenpiteitä suorittaessa tärkeää erottaa korjausperiaate ja -tapa toisistaan. Suomen betoniyhdistys ry:n julkaisun BY41 2016 mukaan standardi SFS EN 1504 käsittää yksitoista erilaista korjausperiaatetta betonirakenteille. Näiden korjaustavoiksi luetaan useita kymmeniä tapoja. Korjausperiaatteita ja -tapoja valittaessa on tärkeintä suunnitella ja toteuttaa tapa, jonka pohjalta vauriot eliminoidaan eikä uusia vaurioita pääse syntymään. Näihin seikkoihin standardin luettelo ei vastaa, vaan lähinnä esittelee ja havainnollistaa erilaisia toteutusvaihtoehtoja.

BY41 2016 julkaisu jaottelee korjaustoimenpiteiden valinnan kolmeen pääläjiin teknisiin-, taloudellisiin- ja yhteiskunnallisiin seikkoihin. Korjaustavan valinta on keskeisimpiä tekijöitä korjaushankkeen tai työvaiheen kannalta, jossa korjausta toteutetaan. Näistä tekijöistä suunnittelija sekä korjaustyön toteuttaja käyvät keskustelua ennen korjaustoimenpiteisiin ryhtymistä. Lisäksi korjaustoimenpiteiden osalta on huomioitava asioita kuten hyväksytäänkö valitun korjaustavan sisältämät riskit onnistumisesta tai tavoitellaanko halvempaa korjausta lyhyellä käytöllä vai kalliimpaa korjausta pitkällä elinkaarella.

4.1 Betonirakenteiden korjauksen kehittyminen

Halkeamien korjaamisen kehityksen osalta sementti-injektointilaitteita on ollut Suomessa 1920-luvulta asti. Ensimmäiseksi luetuksi ohjeeksi injektoinnin osalta ovat luoneet Jukka Vuorinen ja Eero Järviö *Ohjeita injektointitöiden suorittamiseksi*, Oulujoki Oy (1952). Siltojen korjausohjeen 1.233 (09/2016) mukaisesti ohjeessa injektoinnilla tarkoitetaan juoksevassa tilassa olevan aineen puristamista paineellisena rakoihin tai rakenteisiin. Kovettumisen tapahduttua tällä menetelmällä haitalliset vaikutukset saataisiin raossa ja onteloissa poistettua. Vuorisen ja Järviön ohjeistus käsitteli injektointia suhteituksen, työmenetelmien, laa-

dunvarmistuksen ja myös työturvallisuuden näkökulmasta. Halkeamien korjauksen kehitys on edennyt ja kehittynyt rakennusprojektien mukana vuosikymmenten aikana. Tällaista rakennushankkeista muodostunutta kehittyneisyyttä eri rakennuskohteiden osalta injektoinnissa on ollut tiedon ja kokemusten leviäminen voimalaitoksista muihin rakenteisiin kuten siltoihin.

4.2 Halkeamien korjaaminen

Lähtökohtaisesti betonirakenteiden halkeamat ovat kuormituksesta aiheutuneita rakenteellisia halkeamia, jotka ulottuvat vähintään rakenteen neutraaliakselille tai menevät siitä läpi. Halkeilu voidaan jakaa kolmeen tyyppiin rakenteelliseen- ja vaurioitumisesta johtuvaan halkeiluun sekä pinnan verkkohalkeiluun. Mikäli teräsbetonirakenteen halkeamassa on vesivuoto, tulee korjaus toteuttaa ensi tilassa. Muissa tilanteissa halkeaman luonne, säilyvyys ja vaikutus rakenteen kapasiteettiin määrittelevät korjaustyön kiireellisyyden. Eri korjaustyön ratkaisuja sekä kiireellisyyttä arvioimalla käynnistyy korjaustoimenpiteen suunnitteluprosessi. Halkeamien korjaamiseen injektointi- ja sulkuaineen valinta vaatii materiaalien tuntemusta sekä ammattitaitoa. Betonirakenteiden korjausohjeet BY47 (2016) mukaan injektoinnilla voidaan korjata yli 0,2 mm leveitä halkeamia, kun tätä kapeammat halkeamat korjataan esimerkiksi imeyttämällä.

Suunnittelijan on ennen injektointisuunnitelman laatimista esitettävä halkeilun syy. Lisäksi on esitettävä työmäärän arvio sekä korjaustyön periaateratkaisu valmistelu vaihtoehtoja vertailemalla. Huomioitavana seikkana betonirakenteiden korjauksessa on turvallisuusasiakirjojen lisäksi eri haitta-aineiden sekä vaarallisten ja erityisjätteiden tuomat lisähaasteet suoritettavaan työhön. Kun rakennushankkeen tilaaja on hyväksynyt suunnittelijan laatiman esityksen toteutettavasta korjauksesta, tulee suunnittelijan laatia työstä injektointisuunnitelma. Suunnitelma pitää sisällään yleisesti laatuvaatimukset ja toimenpiteet onnistuneen lopputuloksen varmistamiseksi, olosuhde- ja materiaalivaatimukset sekä työstettävän kohteen ja työmenetelmän. Injektointisuunnitelma voi olla korjaushankkeen työselityksen osa tai myös kokonaisuudessaan erikseen toteutettava suunnitelma. Urakoitsija on velvollinen laatimaan injektointisuunnitelman pohjalta työ- ja laatusuunnitelman. Tässä prosessissa urakoitsija ehdottaa mahdolliset muutokset ja täydennykset suunnittelijan laatimaan injektointisuunnitelmaan.

Halkeamien korjauksen osalta käytettävät injektointiaineet luokitellaan SFS-EN 1504-5:2004 standardissa suunnitellun käytön perusteella. Aineet jaetaan kolmeen luokkaan, jotka ovat voimia siirtävä-, joustava- ja paisuva betonin halkeamien, kolojen ja rakojen täyttö. Lisäksi injektointiaineilla on sideaineensa, jotka voivat olla hydraulisesti sitoutuva tai reaktiivinen polymeeri.

SILKO 1.233 (2016) ohjeen mukaan injektoinnin laadunvarmistuksen osalta tulee työtä tekevällä urakoitsijalla olla RALA:n toimialan 5.9 pätevyys injektointitöihin tai muu vastaava sertifikaatti. Lisäksi vaaditaan kahden vuoden kokemus alalta. Injektointityöstä toteutetaan ennakkokoe sekä mallityö, jonka perusteella todetaan sen kelpoisuus tilaajan asettamille vaatimuksille. Mallityön osalta varmistetaan onnistumisesta lieriöporalla otettavalla näytteellä. Injektointityöstä pidetään yllä injektointi pöytäkirjaa aina työn etenemän mukaisesti. Injektointi- ja imeytys-työn laadunvarmistustoimenpiteet esitetään tarkemmin ja laajasti standardin SFS_EN 1504-10 taulukossa 14. Näistä toimenpiteistä täsmennetään työtä koskevat vaiheet ja toimenpiteet tarkennettuna työ- ja laatusuunnitelmaan.

	Ominaisuus	Kapillaarinen imeytys epoksilla EP-T	Epoksi-injektointi EP-I	Polyuretaani-injektointi PUR-I	Sementti-injektointi ZL-I	
	1	2	3	4	5	
1	Halkeaman leveys, w	>0,10 mm	>0,10 mm ¹⁾	>0,10 mm	>3 mm ⁶⁾	
2.1	Halkeaman leveys	lyhyin välein	kielletty	<0,1 w tai ²⁾ <0,03 mm	ennakkokokeen mukaan ⁵⁾	kielletty
2.2	vaihtelee ennen	päivittäin	kielletty	riippuu epoksin lujuudenkehityksestä ³⁾	ennakkokokeen mukaan ⁵⁾	kielletty
2.3	toimenpidettä	pitkin välein	kielletty	rajoittamaton	ennakkokokeen mukaan ⁵⁾	kielletty
3	Halkeaman tai sen reunojen kosteus	kuiva	kuiva tai kostea ⁴⁾	kostea tai märkä	märkä	
4	Edeltävät toimenpiteet	ei ehtoja	täyttö epoksilla kielletty	Uusintatäyttö mahdollista	hartsikäsittely kielletty	
5	Halkeaman syy	tunnettu, syy ei toistu	tunnettu, syy ei toistu	tunnettu	tunnettu, syy ei toistu	

¹⁾ Halkeaman pääosassa.

²⁾ Kumpi on pienempi valitaan.

³⁾ Rajoittamaton, jos lujuus ≥ 3 N/mm² kymmenen tunnin kuluessa ja injektointiolot ovat sopivat.

⁴⁾ Kosteille halkeamille on erityisiä vaatimuksia.

⁵⁾ Yleensä <0,25 w.

⁶⁾ Erikois menetelmille (esimerkiksi mikrosemiitti) valitaan pienempi

Kuva 12: SILKO 1.233 ohjeen taulukko 12 mukaisia ehtoja käytettäville imeytys- ja injektointiaineille.

Halkeamat jaetaan Non-structural cracks in concrete, 2010 The Concrete Society julkaisun mukaan kahteen ryhmään auttamaan suunnittelijaa korjaustavan valitsemisessa. Ryhmät ovat stabiilit- ja epästabiilit halkeamat. Stabiilit halkeamat eivät todennäköisesti avaudu, sulkeudu tai laajene. Ne jaetaan vielä hius- (< 0,5 mm), keskisuuriin (0,5...1,5 mm) ja laajoihin (> 1,5 mm) halkeamiin. Epästabiilit halkeamat taas ovat muuttuvia halkeamia, joissa tapahtuu liikettä esimerkiksi kosteuden, lämpötilan ja kuormituksen muuttuessa.

4.2.1 Sementti-injektointiaineet

Sementillä injektioimisessa toiminta perustuu sementin kykyyn reagoida veden kanssa, jonka lopputuloksena muodostuu kovaa sementtikiveä. Parhaiten sementillä injektioimisen hyödyt tulevat esiin puristuslujuutta vaativissa korjauksissa sekä suuremmissa täytöissä. Lisäksi palonkestävyydeltään sementti on muovijektointeja parempi vaihtoehto. Sementit jaetaan maksimiraekoon mukaan mikro- ja hienosementtiin (<20µm), hienosementtiin (20 – 40 µm) ja rakennusementtiin (> 40 µm). Mikro- ja hienosementtien on täytettävä standardin SFS-EN 197-1 pääosin muutamilta poikkeuksilta, kun taas rakennusementin on täytettävä standardin vaatimukset kokonaan. Vesi-sideainesuhteen kasvattaminen parantaa massan injektioitavuutta, mutta laskee lujuutta. Nesteyttimen käyttö on parempi vaihtoehto, kuin vesi-sideainesuhteen kasvattaminen. Lisäksi sementti-injektointiaineita käytettäessä on huomioitava injektioitavan halkeaman tai kolon esikostutus, jotta betonirakenne ei ime injektointimassasta vettä liikaa.

	Mikrosementti	Hienosementti	Rakennusementti
Tilavuuspaino, kg/m ³	2900–3200	3100–3200	3100–3200
Suurin raekoko, µm	16 (100 %) ¹⁾	40 (100 %) ¹⁾	> 64 (95 %) ¹⁾
Ominaispinta-ala, m ² /kg	2000–2400 ²⁾	1100–1500 ²⁾	350–550 ³⁾
Sitoutumisaika, min.	35–45	90–120	110–180
Puristuslujuus, MPa, 2 d	30–35	25–30	15–35
28 d	60–65	55–60	45–65

¹⁾ Suurimman seulan läpäisyprosentti

²⁾ BET (typpi-adsorptio), määritetään standardin ISO 9277 mukaan

³⁾ Määritetään standardin SFS-EN 196-6 mukaan

Taulukko 3: SILKO ohjeen 1.233 taulukko 3. Injektioinnissa käytettävien sementtien ominaisuuksista.

SILKO 1.233 ohje käsittelee taulukon mukaisia sementtejä seuraavasti. Mikrosegmentti on erittäin hienoksi jauhettua sementtiä. Lisäksi on olemassa ultrahienoja mikrosegmenttejä ($\leq 6\mu\text{m}$) joita käytetään rakenteiden vahventamiseen ja tiivistämiseen. Hienosementti on ominaisuuksiltaan mikrosegmentin kaltaista, mutta suurempi raekoko rajoittaa injektointivuutta. Näitä laasteja voidaan käyttää jopa 1 mm levyisten halkeamien injektointiin. Rakennussegmentin on oltava standardin SFS-EN 197-1 mukaista CEM I rakennussegmenttiä. Sementtien lisäksi injektointimassaan on mahdollista sekoittaa lisäaineita ja seos- ja väriaineita. Näiden toiminta ja tarkoitus on vastaavanlainen, kuin betonimassaan lisättävillä aineilla, mutta lisäaineet ovat kehitetty suoraan injektointiin käytettäväksi. Lähtökohtaisesti lisäaineet muodostavat notkistavia ja paisuttavia ominaisuuksia.

4.2.2 Muovi-injektointiaineet

Muoveista betonirakenteiden injektointiin pääosin epoksia. Polyuretaani ja erikoistapauksissa akryyli ovat myös vaihtoehtoinen materiaali. Muita käytettäviä materiaaleja on esimerkiksi polyesterihartsia, mutta sen kosteuden kestävyys kovettumattomana on huono, eikä sitä tule käyttää sillanrakentamisessa. SILKO 1.233 ohjeen mukaan nämä materiaalit vaativat injektointirakenteen olevan vähintään $+12\text{ °C}$ ja niitä ei tule käyttää ilman asiantuntijan lausuntoa, mikäli rakenteen lämpötila on alle $+5\text{ °C}$.

Taulukko 4. Esimerkkejä injektointiin käytettävien polymeerien ominaisuuksista verrattuna betoniin.

	Epoksi	Polyuretaani	Betoni
Tilavuuspaino, kg/m^3	1050–1150	1050–1100	2100–2400
Puristuslujuus, MPa	3,5–85 ¹⁾	2,5–30 ¹⁾	20–70
Taivutuslujuus, MPa	10,5–35	1,5	3,5–7
Vetolujuus, MPa	3,5–35	0,2–30	2–5
Venymä, %	0,2–50	10–400	0,01

¹⁾ Testausmenetelmät eivät ole vertailukelpoisia betoniin verrattuna.

Taulukko 4: Esimerkkejä injektointiin käytettävien polymeerien ominaisuuksista verrattuna betoniin. (SILKO 1.233)

Injektointiin käytettävät epoksit muodostuvat kahdesta tai useammasta komponentista. Taulukosta 4 voidaan havaita, että verrattuna betonin ominaisuuksiin on epoksi etenkin taivutus- ja vetolujuudeltaan vahvempaa, sekä sietää venymää

paremmin. Lähtökohtaisesti injektointiin käytettävillä epokseilla on matala viskositeetti, jolloin aine tunkeutuu halkeamaan mahdollisimman helposti. Korkeamman viskositeetin omaavat tiksotrooppiset epoksit tulevat tarpeeseen yli 1 mm levyisissä halkeamissa. Tiksotrooppisia epokseja voidaan hyödyntää halkeamassa, joka on täytynyt vedellä, koska korkeamman viskositeetin massa ajaa veden pois edellään halkeamasta. Epoksit soveltuvat ylipäättään hyvin veden yhteydessä käytettäväksi, koska eivät tällöin kutistu, laajene tai vaahtoa. Epoksin reagoidessa ja kovettuessaan se kehittää itsessään lämpöä, joka nopeuttaa kovettumista. Injektointityön ja epoksien annostelussa on otettava huomioon nämä seikat, jotta epoksi ei kovetu tai injektointi työ vaikeudu liian aikaisesta kovettumisen alkamisesta. Epoksilla injektoitaessa on alle +10 °C lämpötilassa on ryhdyttävä toimiin injektoitavan rakenteen lämmittämiseksi.

Polyuretaanit ovat niin suunnittelijan kuin työntoteuttajan kannalta haasteellisempia materiaaleja, koska ne poikkeavat paljon toisistaan. Merkittävimpiä eroja polyuretaaneilla ovat reaktiossa tapahtuva laajeneminen ja eteneminen halkeamiin. Lisäksi osa polyuretaaneista ovat tyypiltään sellaisia, että reagoivat kosteuden tai veden kanssa, kun taas tyypiltään toisenlaiset vaativat kuivat olosuhteet injektointityötä tehdessä. Muita eroavaisuuksia polyuretaanien välillä on lueteltuna SILKO 1.233 s.22 joita ovat esimerkiksi reagointinopeus, viskositeetti, vesiliukoisuus, solurakenne, pitkäaikaispysyvyys, ympäristöturvallisuus ja käyttöominaisuudet.

Lähtökohtaisesti polyuretaaneja käytetään vesivuotojen korjaamiseen halkeamissa ja työsaumoissa. Tällaista injektointia voidaan suorittaa perinteisesti porausten ja injektointitulpan kautta tai rakenteeseen ennen betonointia asennettujen injektointiletkujen kautta. Erikoislujia polyuretaaneja (>30 MPa) voidaan käyttää myös rakenteellisiin korjauksiin. Injektoitavan polyuretaanin reagointiaika vaihtelee muutamista sekunneista aina puoleen tuntiin. Näiden tekijöiden takia on käytettävät polyuretaanit työtapoineen valittava huolellisesti käyttökohteen ja olosuhteiden mukaan. Käytettäviä polyuretaaneja ovat esipolymerisoidut 1-komponenttiset veden kanssa reagoivat, kohteessa sekoitettavat 2-komponenttiset sekä 2-komponenttiset, joissa vesi on toinen komponentti. Mainittuja polyuretaaneja on niin veteen liukenemattomina kuin vesiliukoisina (SILKO 1.233 2016).

Akryylihartseja käytetään injektointiin, kun se tapahtuu erillisen injektointiletkun avulla. Akryylihartsi kovettuu esimerkiksi betonirakenteen työsaumaan injektointiletkun kautta ja tiivistää työsauman joutuessaan kosketuksiin veden kanssa. Akryylihartsit turpoavat joutuessaan kosketuksiin veden kanssa, mutta eivät sovellu käytettäväksi runsaan vesivuodon pysäyttämiseen johtuen noin 40 minuutin sitoutumisajasta. Lisähuomiona akryylihartseihin on, että osa niistä sisältää klorideja, jonka takia niiden käyttäminen on kiellettyä, kun riskinä on kosketus betonin raudoitukseen. Kuvassa 13 on Muottikolmion valikoimasta löytyvä injektointiletkusarja, kuvassa oranssi on WEBAC Type 2 -injektointiletku sekä kaksi 100 bar kestävästä syöttöletkua. Lisäksi samainen pakkaus pitää sisällään Letkun kiinnikkeet, voimaliitokset, lyöntiniittejä sekä muottiin asennettavat injektointikartiot ja injektointinipat. Kuvan 13 vastaavalla tuotteella pystytään toteuttamaan muovi-injektioita, joita edellä käsiteltiin.



Kuva 13: WEBAC®Type 2 -injektointiletkusarja (Muottikolmio)

4.2.3 Sulkuaineet

Injektointityössä käytettävien sulkuaineiden pääasiallinen tarkoitus on tiivistää injektoitavan rakenteen pinta siten, että injektointiaine ei pääse vuotamaan ulos täytettävästä halkeamasta. Sulkeminen, joka on onnistunut, takaa tyhjätilan täyttymisen injektointiaineella rakenteeseen syntyvän paineen avulla. Sulkuaineet

jaetaan neljään eri luokkaan reagoivien aineiden pohjalta. Polyesteripohjaisiin, epoksipohjaisiin, akryyli- ja polyuretaanipohjaisiin ja sementtipohjaisiin. Lisäksi on olemassa muita sulkuaineita kuten polyuretaanimassat, teippi tai steariini. Aiemmin käsitellyn tiksotrooppisen epoksin kanssa ei yleensä sulkuainetta tarvita, sillä se ei vuoda helposti pois halkeamasta. SILKO 1.233 (2016) ohje käsittelee sulkuaineita seuraavasti. Sulkuaineille asetettavia vaatimuksia ovat hyvä levitettävyyden ja riittävä tartunta niin kuivaan, kuin kosteaankin pintaan. Sulkuaineen tulee kovettua nopeasti, kestää rakenteen liikkeitä. Lisäksi tarpeen vaatiessa poistettavuuden tulee olla hyvä sekä niiden tulee olla yhteensopivia kosketukseen tulevien aineiden kanssa.

Polyesteripohjaisten sulkuaineiden kovettuminen on helposti säädettävissä tarvittaessa hyvinkin nopeaksi ja ne ovat myös helposti levitettäviä. Tartunta tapahtuu ainoastaan kuivaan betonin pintaan. Niiden poistaminen on suhteellisen helppoa hiomalla tai neula- tai piikkihakkurilla.

Epoksipohjaiset sulkuaineet ovat kohtalaisen helppoja levittää ja erikoislaatuiset tarttuvat myös kosteaan pintaan. Mikäli epoksipohjaisten aineiden kanssa työkennellä märeissä pinnoissa tai veden alla on käytettävä tuotekohtaisesti määriteltäviä lisäaineita. Epoksit kestävät hyvin injektoinnissa käytettävää painetta ja ovat muutenkin vaikeasti poistettavia. Huomioitavaa on, että aineiden kovettuminen on hidasta etenkin matalissa lämpötiloissa.

Akryyli- ja polyuretaanipohjaiset sulkuaineet ovat pinnoitetyyppisiä aineita, jotka soveltuvat parhaiten laajojen ja lähes tiiviiden pintojen tiivistykseen. Aiemmin viitattu SILKO ohje ei käsittele näitä sulkuaineita tarkemmin. Akryylipohjaiset aineet ovat kuitenkin lähtökohtaisesti elastisia ja joustavia, jotka kestävät myös UV-säteilyä. Ne soveltuvat mainitusti laajoille alueille ja kun halutaan säilyttää rakenteen liikuntamahdollisuudet. Akryylipohjaiset eivät ole yhtä kestäviä, kuin polyuretaanipohjaiset aineet. Polyuretaanipohjaiset aineet taas ovat erinomaisia tarttumaan ja kestämaan sekä ne ovat vedenpitäviä. Reagoivat usein kosteuden kanssa, jonka pohjalta muodostuu kestävä ja tiivis täyttö. Parhaiten soveltuvat syviin halkeamiin ja vedenpaineen alaisiin rakenteisiin. Näiden erot muodostuvat joustavien kohteiden ja vedenpitävyyttä vaativien kohteiden välille.

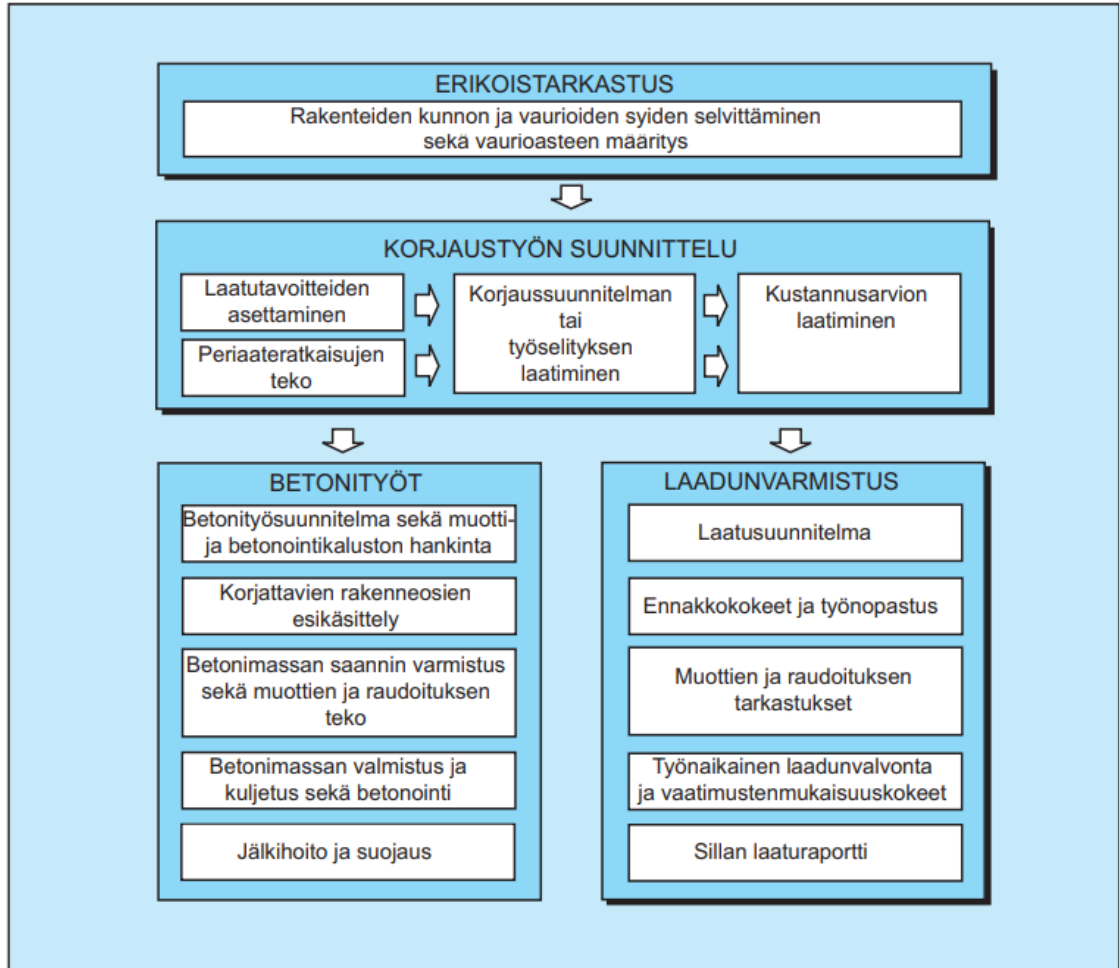
Sementtipohjaiset sulkuaineet soveltuvat samoten laajojen pintojen kohtuullisen paksuihin tiivistyksiin. Paksut sulkukerrokset onnistuvat tehdä tavallisella betoni-laastilla, kun taas ohuet kerrokset tehdään polymeeripitoisilla laasteilla. Polymeeripitoiset laastit tarttuvat myös kosteisiin pintoihin. Sementtipohjaisista aineista vesivuodon kanssa käytetään nopeasti kovettuvia laasteja eli pikatulppia. Sementtipohjaista sulkuainetta voidaan käyttää halkeaman injektoimisen yhteydessä ulkonäöllisistä syistä, mutta on otettava huomioon injektoinnissa käytettävä paine suhteessa sementtipohjaisten aineiden huonoon paineenkestävyyteen.

4.3 Betonilla suoritettavat korjaukset

Betonilla suoritettavia betonirakenteen korjauksia toteutetaan silloin, kun vauriot ovat paikallista laajempia eikä taloudellisista syistä laastilla paikkaaminen ole enää järkevää. Betonilla tehtävissä korjauksissa vaihtoehtoina on toteuttaa korjaus muottia ja valubetonia hyödyntämällä. Mikäli valubetonin käyttö ei onnistu tai ole työntoteutuksen tai taloudellisten syiden takia järkevää on korjaus mahdollista toteuttaa ruiskubetonointina. Betonilla suoritettavien korjausten laatuvaatimuksista huomioitavia tekijöitä BY41 (2016) mukaan ovat käytettävän betonin poistomenetelmät, käytettävät pintojen puhdistusmenetelmät, kriteerit vaurioituneiden kohteiden määrittämiseksi, työolosuhteet ja jälkihoitovaatimukset. Näitä tekijöitä suunnittelijan tulee myös yksilöidä suunnitelma-asiakirjoihin.

Korjaushanketta ohjaa eri standardit. Esimerkiksi sillankorjaushankkeessa edetään eurooppalaisen standardin SFS-ENV 1504-9 vaiheiden mukaisesti. Korjaushanke prosessi osalta on tärkeintä selvittää olemassa olevan rakenteen kunto, suunnittelulähtökohdat, ympäristö – ja rakentamisolosuhteet, rakenteelle alun perin asetetut vaatimukset ja tulevan käytön vaatimukset sekä käyttöolosuhteet.

Betonilla suoritettavista korjauksista laaditaan rakennesuunnitelmat sekä rakenteen korjaussuunnitelma. Nämä suunnitelmat toteuttaa ja niistä vastaa suunnittelija. Urakoitsija laatii toteutettavasta työstä betonityösuunnitelman sekä laatusuunnitelman, joissa toteutettavasta työstä tai työvaiheesta ilmenee ajankohta, vastuuhenkilöt ja toteutustapa eri seikat huomioiden. Kuva 14 selventää betonirakenteen korjaustyön eri vaiheita ja etenemää.



Kuva 14: Betonirakenteen korjaustyön vaiheet (SILKO 1.201, 11/07)

Korjattavan rakenteen betonipinnan poistoa voidaan toteuttaa useilla eri menetelmillä, joista yleisimmät ovat mekaaninen- tai vesipiikkaus. Lisäksi betonia voidaan poistaa murtamalla, jyrsimällä tai hiomalla ja leikkaamalla.

Mekaaninen piikkaus soveltuu lähtökohtaisesti pienimuotoisempiin ja tarkkuutta vaativiin korjauksiin. Se vaatii ammattitaitoisen tekijän, joka toteuttaa työn suunnitelluissa rajoissa, eikä aiheuta ylimääräistä vahinkoa betonirakenteelle. Menetelmä aiheuttaa myös tärinää, joka voi vahingoittaa terveitä betoniosia. Lisäksi se on hidas toimenpide laajemmissa kohteissa, mutta samalla kustannustehokas

tapa pienempiin ja keskikokoisiin korjauksiin kun poistotehon ei tarvitse olla suuri. Mekaaninen piikkaus aiheuttaa pölyä ja betonista lohkeavaa lopputuotetta. Lisäksi se tuottaa merkittävästi melua alueella, jolloin vaaditaan erityisiä huomioita turvallisuuden ja ympäristön osalta.

Vesipiikkaus soveltuu erinomaisesti laajoihin korjauskohteisiin ja tilanteisiin, joissa rakenteen kantavuus ei saa vaarantua tärinästä (mekaaninen piikkaus). Menetelmä ei tuota ylimääräistä tärinää, jolloin se säilyttää olemassa olevan rakenteen ehyenä ja minimoi riskit terveeseen betonin ja raudoituksen osalta. Laadunvarmistuksen osalta vesipiikkaus on varma tapa, koska se poistaa korkea vesipaineen avulla heikon betonin, jolloin terveet alueet jäävät ehjäksi. Huomioitavaa on kuitenkin vesipiikkauksessa syntyvä piikkausjäte, jota sinkoutuu työalueen läheisyyteen. Se on kerättävä talteen sekä huolehdittava ympäristön ja muiden alueella liikkuvien turvallisuudesta. Lisäksi vesipiikkaus on äänitasoltaan mekaanista piikkausta matalampi.

4.3.1 Ruiskubetonointi

Ruiskubetonointia käytetään lähtökohtaisesti rakenteen pinnan laaja-alaisiin korjauksiin, jotka eivät ulotu kovin syväälle. Lisäksi menetelmää voidaan käyttää suojabetonipaksuuden kasvattamiseen ja rakenteiden vahvistukseen. Ruiskubetonoinnilla saavutetaan uuteen rakenteeseen tiivistä betonia, joka on samalla uutta ja lujaa. Huomioitavaa on, että ruiskutettavabetoni kasvattaa vanhan rakenteen omapainoa, jolloin vaikutus kantavuuteen tulee selvittää. Sillan rakentamisen ja -korjauksen osalta ruiskubetonoinnin tulee täyttää Väyläviraston laatuvaatimukset tai standardin SFS-EN 14487-1 ominaisuuksien mukaiset vaatimukset.

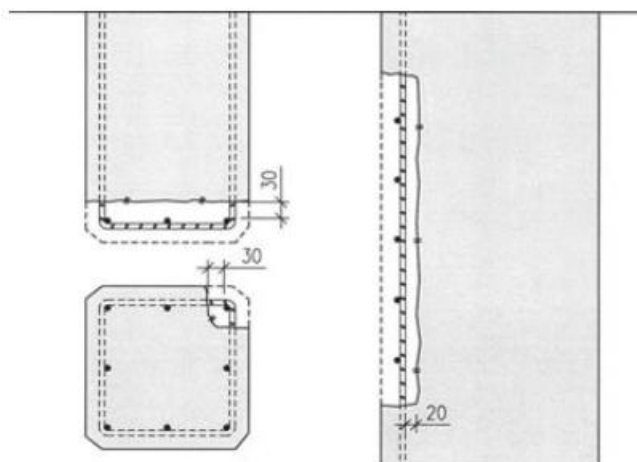
Ruiskubetonointi toteutetaan aina suunnittelijan laatiman korjaussuunnitelman sekä urakoitsijan työ- ja laatusuunnitelman mukaisesti. Ruiskubetonointi vaatii rakenteen lämpötilan olevan kovettumisen ajan vähintään +5 °C ja tuulen nopeus saa olla korkeintaan 2 m/s. Mikäli olosuhteet eivät täyty on ruiskutus toteutettava esimerkiksi käyttämällä sääsuojaa. Halkeiluriskin kasvun välttämiseksi on työn aikana suositeltu lämpötila +5...+20 °C ja märkäseosruiskutuksella massan lämpötila +10...+20 °C (SILKO 2.234, 2024). Lisäksi kloridipitoisen tai karbonatsoi-

tuneen betonin tulee olla poistettu, jotta voidaan varmistua laadukkaasta ja kestävästä lopputuloksesta. Toteutetun ruiskubetonin paksuuden tulee olla aina vähintään 10 mm. Tartuntapinnan vetolujuuden varmistaminen toteutetaan standardin SFS-EN 14488-4 *Ruiskubetonin testaus. Tartuntalujuus porattujen lieriöiden suoralla vetokokeella* (2008) mukaisesti. Kantavien rakenteiden osalta tartuntalujuus tulee olla vähintään 1,2...1,5 MPa ja ei-kantavissa rakenteissa vähintään 0,7 MPa. Tartuntalujuus mitataan vetokokeella (kuva 15). Lisäksi on huomioitava, että korkealaatuinen ruiskubetoni on hyvin lujaa ($\geq C35/45$) ja tiivistä. Tämän takia myös ruiskubetonoitavan pinnan tulee olla lujaa betonia.



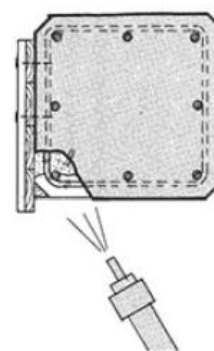
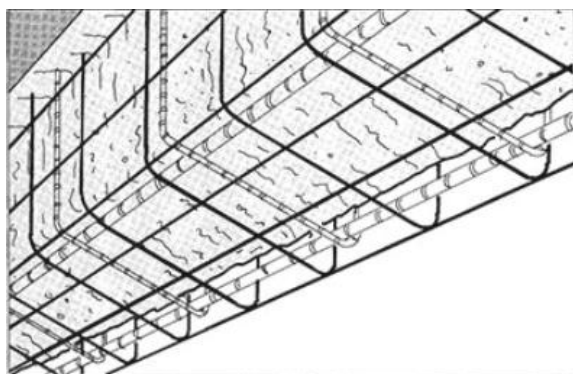
Kuva 15: Tartuntalujuuden varmistaminen vetokokeella (SILKO 2.261, 2016)

Käytännön toteutuksessa huomioitavia tekijöitä ruiskubetonoinnin osalta on ruiskuttajan vapaa ja joustava siirtyminen ruiskutuskohteeseen, jolloin työssä ei synny turhia keskeytyksiä. Raudotteiden tulee olla puhtaita tartunnan varmistamiseksi ja vanhaa betonia tulee poistaa raudotteiden ympäriltä vähintään 15 mm tai 1,5 kertaa raudotteen halkaisijan verran. Lisäksi betonia tulee poistaa kuvan 16 mukaisesti. Tällöin mahdollistetaan onnistunut lopputulos uuden betonin tartunnan osalta vanhaan betoniin. Mikäli suunniteltu ruiskubetonipaksuus ei takaa riittävää korroosiosuojaa raudotteelle on rauditus käsiteltävä korroosiosuoja-aineella.



Kuva 16: Piikkauksen ulottama korjattavaan rakenteeseen (SILKO 2.234 2024)

Ruiskubetonointi voidaan toteuttaa puhtaasti kohtisuoraan pintaan nähden tai sitten, että alkuperäisen muodon säilyttämiseksi ruiskutusta varten asennetaan muotti. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi palkit ja pilarit, joissa muoto halutaan tietynlaiseksi. Lisäksi esiin piikattua raudoitusta on mahdollista vahvistaa raudoittamalla esimerkiksi palkki uudelleen ennen varsinaista ruiskutusta. Lisäraudoituksella voidaan rakennetta esimerkiksi vanhan raudoituksen ollessa vähäinen tulevaisuuden mitoitukselle tai jos betonipeitteestä on ilman lisäraudoitusta tulossa liian paksu.

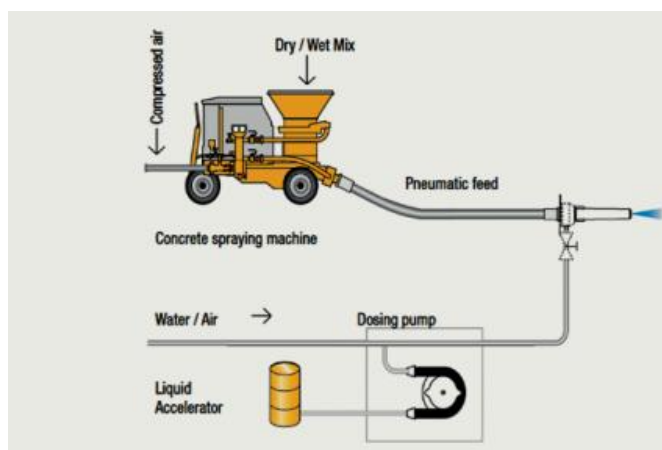


Kuva 17 (vas.) Raudoitusverkolla vahvennettu palkki. Kuva 18 (oik.) Vanhan rakenteen muodon säilyttäminen ruiskuttaessa muottia hyödyntämällä. (Kuvat SILKO 2.234)

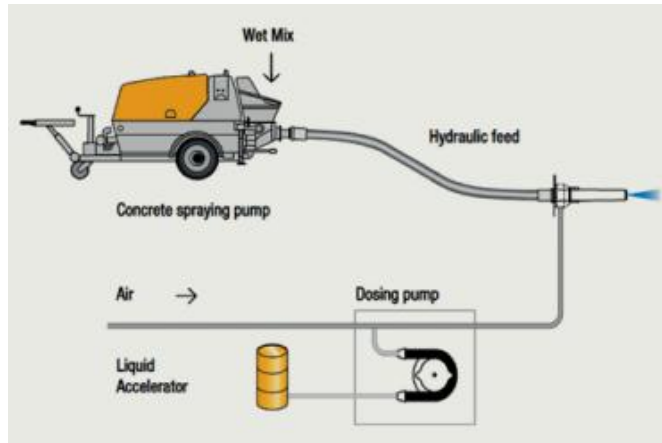
Ruiskubetonointi tulee tehdä enintään 20–25 mm paksuisina kerroksina, jota on helppo seurata esimerkiksi pintaan kiinnitettyjen teräslankojen tai putkien avulla. Ruiskutus toteutetaan pääosin aina joko vaaka- tai pystykaistoina alhaalta ylöspäin edeten, huomioiden työssä, että hukkaroiske ei pääse tahraamaan myö-

hemmin betonoitavia pintoja. Ruiskubetonin pinta voidaan viimeistellä kaavaamalla tai leikata terävällä teräslastalla. Huomioitavaa on, että jos ruiskutuksen tavoitteena on rakenteen kantavuuden lisääminen, ei pintaa tule työstää millään tapaa halkeilun välttämiseksi ja tartunnan takaamiseksi. Kovettuneen ruiskubetonin pintaan voidaan ruiskuttaa pinnanajoa varten erillinen pintalaasti, jota on mahdollista työstää halutunlaiseksi. Ruiskubetonointia on mahdollista toteuttaa kahdella tapaa, märkä- ja kuivaseosmenetelmällä. Näiden kahden väliltä valinta tapahtuu lähtökohtaisesti sen perusteella, onko korjattava kohde sijainniltaan ja laajuudeltaan millainen.

Kuivaseosmenetelmää käytetään rakenteiden korjauksessa lähes poikkeuksetta aina. Tämä johtuu siitä, että korjauskohteissa ruiskuteho ei ole tärkeää ja ruiskutuksessa tulee paljon keskeytyksiä. Lisäksi kuivaseosmenetelmä soveltuu kohteisiin, joissa on useita erillisiä korjattavia osia, tiheä raudoitus tai ahtaita ja vaikea pääsyisiä tiloja. Kuivaseosmenetelmä on BY201 (2018) mukaan Yhdysvalloissa noin 100 vuotta sitten kehitetty ja Suomessa sitä alettiin käyttämään 1970-luvulla kaivosten kallioperän lujitustyössä. Menetelmässä esivalmistettu kuiva tai kevyesti esikostutettu hiekka-sementtiseos siirretään paineilman avulla letkussa suuttimelle. Suuttimessa seokseen lisätään vesi, ruiskuttaja säätelee näkemänsä perusteella veden määrää suuttimessa. Paineilma ruiskuttaa sekoittuneen seoksen ruiskutettavaan kohteeseen. Menetelmässä syntyy hukkaroisetta isompien partikkeleiden osuessa kohteeseen, kun ruiskubetoniseos tiivistyy. Vaakapinnoille kertyvän hukkaroiskeen takia ei menetelmällä voida käsitellä laajojen rakenteiden yläpintoja (BY47 2016). Kuivaseosmenetelmässä investointikustannukset ovat pienet, hukkaroiske suuri ja kapasiteetti pieni.



Kuva 19: Kuivaseosmenetelmän laitteiston toimintaperiaate (BETONI 4/2014).



Kuva 20: Märkäseosmenetelmän laitteiston toimintaperiaate (BETONI 4/2014).

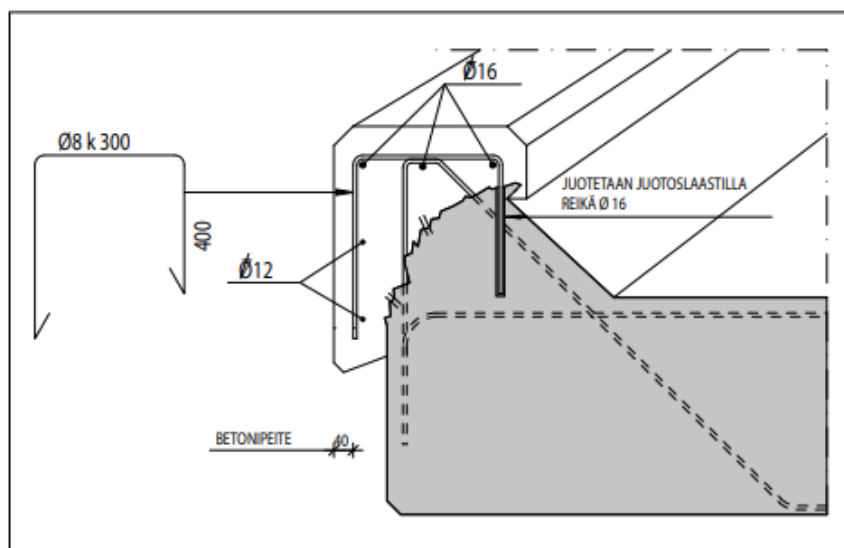
Märkäseosmenetelmässä notkea tai vetelä betonimassa pumppataan erillisellä pumpulla letkussa suuttimelle, joka paineilman avulla ruiskuttaa betonimassan kohteeseen. Suuttimessa ruiskubetonimassaan lisätään kiihdytintä, jolloin massa sitoutuu nopeasti käsiteltävälle pinnalle. Ruiskutuskalusto vaatii tilaa oman kokonsa takia ja menetelmä soveltuukin tämän takia hyvin suuriin kohteisiin, joissa betonin menekki on suuri ja pinnan laatu saa olla karkea. Vastaavia tiloja ovat esimerkiksi kalliotilat, joiden lujituksessa märkäruiskutusmenetelmää käytetään. Märkäseosmenetelmää käytetään myös esimerkiksi sillankorjaustöissä, kun vaaditaan paksuja kerroksia. Märkäseosmenetelmässä huokosten annostus pitää olla noin viisinkertainen normaaliin verrattuna, etenkin jos ruiskubetoni tulee veden alle. Märkäseosmenetelmässä investointikustannukset ovat suuret, hukkariskeä vähäisiä ja kapasiteetti suuri.

4.3.2 Valukorjaukset

Betonirakenteiden korjaamista valamalla käytetään menetelmänä, kun eri rakenteiden reunassa on pitkälle edennyttä raudotteiden korroosiota tai pakkasraupamaa. Lisäksi muita erilaisia suuria korjaustöitä kantaviin rakenteisiin tehdään valamalla. Siltojen reunapalkkien korjaus on yksi selkeä työvaihe, johon hyödynnetään valamalla toteutettavaa korjausta. Valukorjauksia voidaan rakentamisessa toteuttaa vaativiin ja kriittisiin kohteisiin, joissa tiivistys ja muotin täyttyminen ovat kriittisimpiä vaiheita suoritettavassa työssä. Valukorjauksia toteutetaan myös merkitykseltään vähäisiin paikkoihin, jolloin esimerkiksi betonin tiivistys on

mahdollista toteuttaa sullomalla tai vasaralla muottia koputtelemalla suunnittelijan harkinnan mukaan.

Valukorjaustapauksissa korjattavat alueet ovat laajoja, joten vauriokohtien avaaminen toteutetaan lähtökohtaisesti järeällä kalustolla piikkaamalla mekaanisesti tai vesipiikkausta hyödyntäen. Huomioitavaa on järeästi ja suuria alueita poistettaessa, että korjattavan rakenteen tuennasta huolehditaan korjaustoteutuksen aikana. Valukorjauksille toteutetaan ennen raudoitusta, muotitusta ja valua sama vetokoe vaatimuksineen, joka esiteltiin ruiskubetonoinnin yhteydessä. Avatun rakenteen raudoituksen osalta valukorjausten kanssa betoninsuojapeitepaksuus suunnitellaan riittäväksi, jolloin raudoitus tarvitsee usein vain puhdistaa ruosteesta tai klorideista.



Kuva 21: Uusittavan reunapalkin raudoitus-esimerkki (SILKO 2.211, 06/08).

Valukorjauksiin muotit tulee rakentaa siten, että ne ovat tiiviit ja kestävät valuta-
pahtumassa niihin kohdistuvan paineen. Nämä seikat urakoitsijan betonityönjoh-
taja ottaa huomioon betonityösuunnitelmassa. Valu on mahdollista toteuttaa nor-
maalilla rakennebetonilla tai esimerkiksi IT-betonilla, jolloin toteutus onnistuu pai-
nevaluna. Tärkeintä haastavimpien muottien ja raudoitusten kanssa on varmistua
muotin täyttymisestä kokonaan ja huolehtia, että betoni saadaan tiivistettyä suun-
nitellusti. Tiivistyksen osalta oleellimmat paikat ovat etenkin tartuntaraidoituk-
sen alueella, joka kiinnittää uuden ja vanhan betonirakenteen toisiinsa. Betonipin-
nat oikaistaan ja käsitellään vanhan rakenteen vaatimilla tavoilla mahdollisimman
pian valutapahtumasta, jolloin rakenteesta saadaan yhtenäinen myös ulkoisesti.

Jälkihoidosta tulee huolehtia samojen ohjeiden ja määräysten mukaisesti, kuin vastaavissa betonointi kohteissa.

Menetelmässä tulee ottaa huomioon käytettävän betonimassan lujuus, rasitusluokat ja käyttöympäristö. Huomioitavaa on, että korjausmateriaalin tulee olla yhteensopivaa vanhan betonirakenteen kanssa esimerkiksi kutistumiskäyttäytymisen ja lämpölaajenemiskertoimen osalta. Suunnittelijan haasteet korostuvat alkuperäisen säilytettävän betonin määrä ja toteuttavan korjauksen ulottuman kanssa. Haasteellisuutta infra kohteissa asettavat esimerkiksi siltojen ja tierakenteiden läheisyys, jolloin muun liikenteen huomiointi ja turvallisuuden takaaminen on tärkeää.

5 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli muodostaa kokoelma, jossa käsitellään betonirakenteiden halkeiluun ja muodonmuutoksiin liittyen teoriaa sekä käytännön kokemusta. Lisäksi opinnäytetyössä käsiteltiin halkeamien korjaamista pääosin injektoinnin ja betonilla korjaamisen näkökulmasta. Korjaustoimenpiteiden käsittelyn osalta tavoitteena oli havainnollistaa lukijalle korjaustoimenpiteitä yleisesti, mutta myös siitä näkökulmasta mitä toimenpiteitä halkeilu ja muodonmuutokset käynnistävät rakennushankkeella. Teoriaa hyödynnettiin olemassa olevista kirjallisuuden lähteistä sekä eri betonirakenteita koskevista standardeista sekä määräyksistä. Käytännön näkemys yhdistettiin haastatteluvastauksien avulla teorian ja tutkitun tiedon tueksi.

Keskeisimpänä ongelma, jota opinnäytetyö ratkaisi, oli betonirakenteiden laatu-
poikkeamiin, kuten halkeiluun ja muodonmuutoksiin vaikuttavat tekijät ja syyt. Lisäksi osana ongelmanratkaisua oli tarkoitus selvittää ja esittää eri tekijöitä urakoitsijan ja rakennesuunnittelijan toimenpiteiden osalta, jotka mahdollisesti vaikuttavat laatu-
poikkeamiin. Näiden tekijöiden selvittäminen ja yhdistäminen oli opinnäytetyön tutkimuksellinen tavoite, joka onnistui alkuperäisen suunnitelman mukaisesti. Ongelman ratkaisuksi opinnäytetyössä tuotettiin työ, joka käsittelee asioita siten, että betonityönjohtajan tai rakennesuunnittelijan on helppo sisäistää laatu-
poikkeamiin vaikuttavia asioita.

Halkeilun ja muodonmuutosten osalta esiin nousi muutamia selkeitä vaikuttavia tekijöitä, jotka eri osapuolten tulee ottaa huomioon. Betonimassan valmistuksesta ensimmäiset 1...2 vuorokautta ovat merkittävimmät toimenpiteiden osalta, joita työntoteutukseen kuuluu. Urakoitsijan työntoteutuksen lisäksi merkittävässä roolissa on betonirakenteen onnistunut jälkihoito, jonka lopettamisen jälkeen kuivumiskutistuminen käynnistyy välittömästi. Rakennesuunnittelun näkökulmasta merkittävimmäksi tekijäksi nousi oikean betonimassan valinta suunniteltavaan rakenteeseen sekä raudoituksen suunnittelu siten, että mahdollinen halkeilu ja muodonmuutokset pystytään rajaamaan ja hallitsemaan rakenteessa. Lisäksi opinnäytetyössä käsiteltävien tekijöiden tunteminen nousee merkitykseen molempien osapuolten yhteydessä, kun tavoitteena on laadukas ja toimiva betonirakenne.

Kuten todettu, opinnäytetyön aihe on laaja, jolloin jatkotutkimuksille sekä kehitysideoille riittää ehdotuksia. Kirjoittajan näkökulmasta koen, että merkittävimpiä kehitysideoita työssä olisi jatkaa halkeilun ja muodonmuutosten käsittelyä käytännön esimerkeillä kuvien sekä mahdollisesti rakenteiden laskennan kautta. Lisäksi laskentaa voisi sisällyttää rakennesuunnittelun osuuteen esimerkkien avulla. Käytännön esimerkkejä voisi esittää työssä eri rakennushankkeilta valokuvien sekä kyseisen hankkeen avainhenkilöstöä täsmentävin kysymysten avulla haastatellen.

Tämän opinnäytetyön jatkotutkimuksiksi nostaisin halkeilun ja muodonmuutosten osalta tarkemmat tutkimukset esimerkiksi lisäaineiden käytön osalta ja niiden vaikutuksista lopullisen rakenteen halkeiluun ja muodonmuutoksiin. Lisäaineet kun reagoivat erilaisissa betonimassoissa sekä keskenään yhdistettynä hyvin eri tavoilla. Haastattelukysymyksissä J.Humalajoki nosti esiin nykypäivän betonimassojen sisältävän paljon lisäaineita, jolloin on vaikeaa sanoa tarkalleen, mikä johtuu mistäkin, jolloin aihetta olisi hyvä tutkia laajemmin ja tuoda tutkimustieto kaikkien betonirakenteiden kanssa toimivien tietoon. Toisena merkittävänä jatkotutkimuksena, joka työn edetessä tuli mieleen on tulevaisuudessa lisääntyvän vähähiilisen betonin käyttö sekä sen käyttäytyminen halkeilun ja muodonmuutosten näkökulmasta. Vähähiilisen betonin osalta voisi tutkia esimerkiksi lämmöntuoton osalta betonimassan käyttäytymistä. Tutkimuksen voisi toteuttaa esimerkiksi valamalla erilaisia betonimassoja samoissa olosuhteissa, samankaltaisiin muotteihin ja kirjata lopulliset havainnot ylös etenkin lämmöntuoton sekä halkeilun ja kuitistuman osalta.

Opinnäytetyöprosessin koin etenevän suunnitellulla aikataululla sekä sovitun aiheen osalta hyvin. Aihe itsessään oli mielenkiintoinen, joka tarjosi laajan ja antoisan oppimisprosessin työn kirjoittajana. Haastattelukysymysten osalta koen tutkimuksen onnistuneen ja tuoneen käytännön esimerkkejä teorian tueksi. Lisäksi koen aiheen antaneen itselleni kirjoittajana tietoa, joka on tulevaisuudessa oman ammattitaidon kehittämisen osalta merkittävää, kun aiheita on käsitelty pääaiheena opinnäytetyössä.

Aiheen rajaaminen oli yksi merkittävimpiä tekijöitä työn prosessissa. Paljon mielenkiintoisia tekijöitä ja asioita joutui sulkemaan aiheen ulkopuolelle, tulevaisuuden tutkimuksia varten. Aiheen rajaus onnistui luomaan tiiviin paketin tärkeimmistä tekijöistä sekä pitämään opinnäytetyön pituuden maltillisena. Opinnäytetyö opetti itselleni kirjoittajana paljon betonirakentamisen eri tekijöistä, etenkin halkeiluun, muodonmuutoksiin sekä työntoteutukseen liittyen.

Lopuksi voin todeta, että laadultaan onnistunut ja suunnitellussa tarkoituksessa toimiva betonirakenne vaatii laadukkaan sekä ammattitaitoisen toteutuksen aina suunnittelusta toteutusvaiheeseen asti. Haluttuun lopputulokseen pääseminen vaatii ymmärrystä betonirakenteista ja niiden toiminnasta jokaiselta tekijältä. Unohtamatta joustavaa ja avointa keskustelua eri rakennushankkeen osapuolten välillä, jolloin betonirakenteiden laatupoikkeamat ovat vältettävissä sekä rakennushanke etenee taloudellisesta ja aikataulullisesta näkökulmasta erinomaisesti.

LÄHTEET

1. Tiivistelmä Mäkikyrö T, 2017 Betonirakentamisen laatuketju kuntoon, Rakennusteollisuus. https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2017/12/BET1704_86-91.pdf, luettu 3.10.2024
2. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec107.pdf>
Transportation research, October 2006. Control of Cracking in Concrete
luettu 9.10.2024
3. https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/sementin_valmistus_NETTI.pdf
Finnsementti sementin valmistus, luettu 28.10.2024
4. <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/fly-ash/>
Global Cement and Concrete Association: Fly ash, Luettu 29.10.2024
5. <https://finnsementti.fi/sementti/>
Finnsementti tuotesivut, Viitattu 30.11.2024
6. <https://www.betonitieto.fi/> Betonitieto sivut, vaatii tunnukset, luettu 30.10.2024 ja 4.12.2024
7. Suomen Betoniyhdistys ry. 2018 Betonitekniikan oppikirja BY201, 2018. Helsinki: BY-Koulutus Oy
8. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/lisaaineet.html#notkistimet>, viitattu 1.11.2024
9. Suomen Betoniyhdistys ry. 2011 Betoninormit 2012 By 50, 2012. Helsinki: BY-Koulutus Oy

10. Suomen Betoniyhdistys ry. 2016 Betonin kutistuman ja halkeilun hallinta BY67 2016. Helsinki: BY-Koulutus Oy
11. Suomen betoniyhdistys ry. 2016 Betonirakenteiden korjausohjeet BY41 2016. Helsinki: BY-Koulutus Oy
12. Suomen Betoniyhdistys ry. 2013. Betonirakentamisen laatuohjeet BY47 2013. Helsinki: BY-Koulutus Oy
13. Suomen Betoniyhdistys ry. 2016. Betonirakenteiden korjausohjeet BY41 2016. Helsinki: BY-koulutus Oy
14. Suomen Betoniyhdistys ry. 2024 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – Opas suunnittelijoille BY68 2024. Helsinki: BY-Koulutus Oy
15. <https://muottikolmio.fi/tuotteet/rakennustyomaat/injektoinnit/injektointiletkut/webac-injektointiletkusarja/>
Muottikolmio, (Kuva 13), Viitattu 21.11.2024
16. [https://vayla.fi/palveluntuottajat/sillat/silko/Väylävirasto 2023](https://vayla.fi/palveluntuottajat/sillat/silko/Väylävirasto_2023). Siltojen korjausohjeet (SILKO) luettu ja viitattu: 22.11.2024 ja 25.11.2024
17. https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/09/BET1404_30-37.pdf
Petrow Seppo, Betoniteollisuus Ry. Ruiskubetonointi ja sen mahdollisuudet (4/2014)
Luettu 14.11.2024 ja viitattu 14.11.2024

LIITTEET

Liite 1. Haastattelukysymykset

Haastattelu pidetty 22.11.2024. Vastaajana Jari Humalajoki, Työpäällikkö, Kreate Oy

1. Mitkä ovat yleisimpiä betonirakentamisen parissa kohtaamiasi laatupoikkeamia ja missä vaiheessa työntoteutusta ne on huomattu?
2. Mitkä tekijät mielestäsi vaikuttavat eniten halkeiluun betonirakenteissa työntoteuttajan (urakoitsija) näkökulmasta?
3. Oletko kohdannut tilanteita, jossa betonirakenteen virumasta on ollut hyötyä ja/tai haittaa? Jos olet niin millaisissa?
4. Kuinka usein ja millaisissa rakenteissa olet kohdannut betonissa alkalikiiviainesreaktiota? Suomessa luonnonkiviaineshan on yleisesti kemiallisesti hyvin kestävää.
5. Millaisia kokemuksia sinulla on vähähiilisten betonien käytöstä verrattuna perinteisiin betoneihin?
6. Mitkä tekijät koet merkittävimmäksi, joilla suunnitteluvaiheessa voidaan ehkäistä betonirakenteen halkeilua ja muodonmuutoksia?
7. Oletko kohdannut betonimassassa käytettävien lisäaineiden osalta johtuvaa halkeilua, muodonmuutoksia tai muita laatupoikkeamia valmiissa betonirakenteessa?