

Miro Seppälä

# BETONIN KÄYTTÖIKÄLASKENTA JÄÄ- TYMIS-SULAMISRASITUKSESSA

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Kesäkuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Miro Seppälä: Betonin käyttöikälaskenta jäätymis-sulamisasituksessa (Service life calculation of concrete under freeze-thaw stress)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Kesäkuu 2020

---

Tämä työ on kirjallisuustutkimus, jossa tavoitteena on selvittää erilaisia maailmalla käytettyjä betonin käyttöikälaskentamalleja, joiden avulla voidaan laskea vaikutusta betonirakenteen käyttöiälle jäätymis-sulamisasituksen näkökulmasta. Tarkastelu on rajattu kahteen betonin rasitusluokkaan, jotka huomioivat pelkän jäätymis-sulamisasituksen ilman yhteisvaikutusta suojojen kanssa. Suomessa betonin käyttöiälle on vakiintunut kerroinmenetelmäksi kutsuttu laskennallinen malli, jonka toimintaa tässä työssä vertaillaan muihin kehitettyihin käyttöikälaskennan malleihin. Muista malleista ei juurikaan ole suomenkielistä materiaalia, jonka myötä tutkimusta tehtiin tulevien tutkimusten pohjaksi englanninkielisiä lähteitä käyttäen. Vertailua käyttöikämallien välillä suoritetaan kirjallisen selvityksen lisäksi havainnollistavan esimerkkilaskelman avulla.

Jäätymis-sulamisasituksen huomioiminen betonin käyttöiässä on Suomen ilmastossa hyvin merkittävää, sillä ilman lämpötilan vaihtelua positiivisen ja negatiivisen lämpötilan välillä tapahtuu melko paljon. Itse vaurioituminen betonirakenteen sisällä tapahtuu betonin kapillaarihuokosissa olevan veden jäätyessä. Jäätyessään vesi laajenee, jolloin betonin rakenne vaurioituu. Veden sulaessa ja jäätyessä betonin sisällä yhä uudelleen, puhutaan jäätymis-sulamissykleistä, joiden lukumäärän kasvaessa vaikutus betonin vaurioitumiseen kasvaa. Tutkimuksessa havaittiin, että jäätymis-sulamisasituksen vaikutusten kannalta merkittävimpiä tekijöitä betonin käyttöiälle ovat betonilaadun mukaan vaihtelevat materiaaliominaisuudet ja rakenteen ympäristöolosuhteet.

Tutkimusta tehdessä havaittiin, että maailmalla kehitetyissä betonin käyttöikälaskennan malleissa tarvitaan useimmiten laboratoriotutkimuksia ennen kuin laskennan suorittaminen on mahdollista. Laboratoriokokeiden avulla seurataan betonin lujuuden menettämistä jäätymis-sulamissykliä lukumäärän kasvaessa. Yhdessä mallissa tutkitaan betonin kriittisen kosteuden kyllästyminen saavuttamista lujuuden heikkenemisen vaikutuksesta. Muissa malleissa tutkitaan betonilaadulle maksimaalista jäätymis-sulamissykliä lukumäärää, jonka betoni kestää ennen vaurioitumista. Näihin asioihin myös itse käyttöikälaskentamallit pohjautuvat. Laboratoriokokeiden pohjalta tehty suhteutus luonnonmukaisiin olosuhteisiin tapahtuu erilaisilla tavoilla kussakin mallissa määritellyn vertailuluvun avulla.

Vertailuna Suomenkin käytössä olevaan kerroinmenetelmään, osa muista malleista huomioi huomattavasti tarkemmin jäätymis-sulamissykliä lukumäärää. Kerroinmenetelmässä ympäristöolosuhteet ovat upotettuna yhteen kertoimeen, joka vaihtelee melko pienellä skaalalla. Kerroinmenetelmän etuna kuitenkin on, että sen avulla määriteltäessä betonin käyttöikä, ei ole tarpeen suorittaa yhtä merkittäviä laboratoriotutkimuksia kuin esimerkiksi kriittisen kosteuden kyllästympitoisuuden käyttöikälaskentamallissa. Toki laskelman tarkkuuden puolesta syvällisemmät huomiot ovat eduksi, jotta mitoitusta ei tehdä liian raskaaksi.

Avainsanat: Jäätymis-sulamisa, pakkasrapautuminen, käyttöikälaskenta, laskentamalli, kosteus, betonin lujuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO .....	1
2.PAKKASRASITUS .....	3
2.1    Betonin pakkasrapautuminen .....	3
2.2    Betonin rasitusluokat .....	5
2.3    Jäätymis-sulamisvaurioiden ehkäiseminen .....	6
3.KÄYTTÖIKÄLASKENTAMALLIT JÄÄTYMIS-SULAMISRASITUKSESSA .....	7
3.1    Kerroinmenetelmä .....	7
3.2    FIB 34 -käyttöikämalli .....	10
3.3    Lujuuden häviämisen malli .....	13
3.4    Hydrostaattisen paineen malli .....	14
4.KÄYTTÖIKÄLASKENTAMALLIEN VERTAILU .....	17
4.1    Mallien sisältö .....	17
4.2    Mallien käytännöllisyys .....	18
5.LASKENTAESIMERKIT .....	19
6.YHTEENVETO .....	25
LÄHTEET .....	26

# 1. JOHDANTO

Betonin suunnittelussa tulee ottaa huomioon monia erilaisia ympäristöstä riippuvia asioita, joista yksi on pakkanen. Ilman lämpötilan liikkeessä pakkasrajan molemmin puolin, aiheutuu jäätyminen ja sulamisen muodostamia syklejä, jotka vaurioittavat betonia ja lyhentävät betonin käyttöikää. Suomessa on käytössä vakiintunut käyttöikä-laskentamenetelmä, jolle tässä tutkimuksessa pyritään löytämään vertailukelpoisia käyttöikä-laskentamalleja. Tutkimus tehdään, koska muista malleista ei juurikaan löydy suomenkielisiä tietoja, jolloin tutkimusta voidaan hyödyntää syventävissä tutkimuksissa pohjatietona.

Tutkimus lähtee liikkeelle jäätymis-sulamisilmiön määrittämisestä sekä vaikutuksista betonirakenteessa. Tähän liittyy olennaisesti myös betonin rasitusluokat, joiden valintaan erilaiset rasitukset ja ilmiöt vaikuttavat. Määritelmien jälkeen esitetään kirjallisuustutkimuksen avulla löydettyjä jäätymis-sulamisrasituksen käyttöikä-laskentamalleja ja vertaillaan niitä Suomessa tunnettuun menetelmään eri näkökulmista – mallin sisällön, käytännöllisyyden sekä laskennan kannalta. Lopuksi esitetään yhteenveto tutkimuksesta.

Pakkasen aiheuttama rasitus betonille perustuu siihen, että jäätyessään vesi laajenee noin 9 %. Betonin huokosrakenteeseen päässyt vesi aiheuttaa laajetessaan jännitystä betonin rakenteeseen, jonka myötä betoniin muodostuu sisäistä säröilyä. Pitkälle edetessään tämä veden laajeneminen näkyy betonin halkeiluna. (by 42 2019, s. 24)

Suunnitteluvaiheessa tulee huomioida rakenteen alttius pakkasrapautumiselle. Betonin pakkasenkestävyyteen sekä myös muihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa betonin vesi-sementtisuhteella ja erilaisilla lisäaineilla. Betonin lujuus määräytyy sille valittavien rasitusluokkien avulla. Pakkasrapautumista vastaan lujempi betoni kestää paremmin, sillä se sisältää vähemmän jäätyvää vettä sekä kestää paremmin sisäisiä paineita. Betonissa voidaan myös käyttää lisähuokostusta, jonka avulla betoniin muodostuu ilmaa sisältäviä suojaavia huokosia. Suojahuokokset eivät täyty vedellä niin kuin kapillaarihuokokset, vaan toimivat ikään kuin laajenemistilana jäätyvälle vedelle ja näin suojaavat betonia pakkasrasitukselta. (by 42 2019, s. 25, 27)

Käyttöikä-laskennalla tarkoitetaan rakenteen kestävyys suunnittelua sen säilyvyyden kannalta. Suomessa vakiintuneella menetelmällä laskettaessa lähtötietoina tarvitaan

rakenteen rasitusluokka sekä ajanjakso, jonka rakenteen halutaan kestävän. Suunnittelukäyttöikä on ajanjakso, jonka betonirakenteet ominaisuudet säilyvät vaaditulla tasolla, edellyttäen kuitenkin, että sitä pidetään kunnossa. (by 68 2017, s. 66)

## 2. PAKKASRASITUS

Merkittävin tekijä betonin pakkasrasituksessa on kostean betonin altistuminen jäätymsulamissykleille. Jäätymsulamissykli tarkoittaa käytännössä sitä, että rakenne altistuu vuorotellen jäätymiselle, eli lämpötila laskee alle 0 °C:een, sekä sulamiselle, jolloin lämpötila nousee jälleen yli 0 °C:een. Yhtä jaksoa, jolloin nämä molemmat ovat tapahtuneet kertaalleen, kutsutaan jäätymsulamissykliksi. Betonin altistuessa jäätymsulamissykleille, rakenne alkaa vaurioitumaan, jonka voimakkuuteen vaikuttavat erilaiset tekijät. Betonin rakenteen näkökulmasta merkittävin tekijä on betonissa käytetty vesi-sementtisuhde. Mitä suurempi vesi-sementtisuhde on, sitä nopeammin vesi pääsee rakenteeseen, jolloin jäätymsulamissyklien määrän kasvaessa veden laajeneminen betonin sisällä vaurioittaa rakennetta enemmän ja nopeammin. Tämä johtuu siitä, että korkealla vesi-sementtisuhdeella betonirakenteeseen muodostuu enemmän kapillaarihuokosia. Lisäksi keskeisessä roolissa jäätymsulamisasituksen aiheuttamaan vaurioitumiseen on ympäristö- ja kosteusolosuhteet.

Jäätymsulamisasituksen betonirakenteelle aiheuttamaa vaurioitumisilmiötä kutsutaan pakkasrapautumiseksi. Jäätymsulamisellettiina oleville rakenteille on myös määritelty betonin rasitusluokat, joiden avulla sen vaikutusta voidaan ottaa huomioon rakenteellisen mitoituksen suunnitteluvaiheessa.

### 2.1 Betonin pakkasrapautuminen

Betonin rapautuminen tarkoittaa betonin sisäisen rakenteen hajoamista. Pakkasrapautumisen tapauksessa tätä tapahtuu kapillaarihuokosissa olevan veden jäätyessä, mikä aiheuttaa jäätymsulamisaajeneman. Tämän vuoksi betonin huokosverkostoon syntyy painetta, jonka määrä suurenee aina, kun vesi lämpötilan nousun ja sulamisen jälkeen jäätyy uudelleen. (by 42 2019, s. 24)

Betonin pakkasrasituksen ja sitä kautta pakkasrapautumisen voimakkuuteen vaikuttavat monet erilaiset tekijät. Ensinnäkin kosteusrasituksen määrä on merkittävä tekijä, sillä sen suuruuden myötä vesi pääsee kerääntymään nopeammin betonin kapillaarihuokosiin. Kosteusrasituksen määrää mitattaessa tulee ottaa huomioon varsinkin sadeveden määrä sekä ilmansuunta, josta sadevesi vaikuttaa. Kosteus- ja pakkasrasituksen määrä riippuu myös rakenteellisista tekijöistä, kuten betonirakenteen massiivisuudesta, pinnoitteesta sekä sen tuulettuvuudesta. Rakenteelliset tekijät vaikuttavat siihen,

kuinka kosteus pääsee etenemään rakenteessa sekä kuivumaan sieltä ulos. (by 42 2019, s. 15–16)

Myös betonin lujuusluokka on vaikuttava tekijä, sillä materiaalin lujuus vaikuttaa siihen, kuinka paljon vettä imeytyy rakenteeseen. Betonin lujuus taas riippuu vesi-sementtisuhteesta. Lujuus on sitä suurempi, mitä enemmän betoniseoksessa on sementtiä eli vesi-sementtisuhteen ollessa mahdollisimman alhainen. Lisäksi betoni on myös tiiviimpää, koska alhaisen vesi-sementtisuhteen takia betoniin muodostuu vähemmän kapillaarihuokosia. Silloin kun veden imeytyminen on vähäisempää, rakenteessa on vähemmän vettä, joka voi päästä jäätymään. Toisaalta pakkasrasituksen vähentäminen ei ole ainoa tekijä, jonka avulla betonin lujuusluokka määritetään, joten vesi-sementtisuhteen alentamista ei voida suoranaisesti pitää betonin pakkasrapautumisen ehkäisijänä. (by 42 2019, s. 27)

Rapautumisen takia betonin ulkonäkö huononee, mutta suurempana haittana on, että betonin veto- ja puristuslujuus sekä betonipinnan tartuntalujuus heikkenevät. Lisäksi kosteus ja hiilidioksidi pääsevät tunkeutumaan betoniin helpommin, minkä vuoksi rapautuminen etenee nopeammin ja betonin teräsraudoitukset saattavat altistua korroosiolle. Pitkälle edetessään pakkasrapautuminen aiheuttaa betonipintaan halkeamia. Pahimmassa tapauksessa betonielementti saattaa kaareutua, mikä lopulta johtaa betonirakenteen lohkeiluun tai terästen ja ansaiden tartunnan pettämiseen. (by 42 2019, s. 27) Kuvassa 1 on havainne-esimerkki laboratorio-olosuhteissa suoritettujen nopeiden jäätymis-sulamissyklien vaikutuksesta betoninäytteen ulkonäköön. Betoni vaihtaa väriään, jonka lisäksi pinta alkaa rapautumaan. Lopulta myös kappaleen reunat alkavat menettää muotoaan ja tapahtuu halkeilua.



**Kuva 1.** Betoninäyte ennen jäätymis-sulamissyklejä, 200 syklin jälkeen sekä 400 syklin jälkeen (Shang 2014, s. 4)

Pakkasrapautumisen havaitseminen vaatii tarkkoja tutkimustoimenpiteitä. Näitä suoritetaan mielellään tiheästi, jotta rapautuminen havaitaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, jolloin korjaaminen voidaan suorittaa riittävän ajoissa. Rapautumisen vaikutus rakenteen kantavuuteen sekä turvallisuuteen on selvitettävä aina huolellisesti. (by 42 2019, s. 27)

## 2.2 Betonin rasitusluokat

Betonin rasitusluokat määritetään rakenteille ympäristöolosuhteiden mukaan. Luokkia on yhteensä 18, ja ne on jaettu 5 kokonaisuuteen kemiallisten tekijöiden perusteella. XF-luokat käsittävät jäätymis-sulamisrasitukselle alttiina olevat rakenteet. Neljä jäätymis-sulamiskategoriaan kuuluvaa rasitusluokkaa määritellään by 50:n (2012, s. 89–90) mukaan seuraavasti:

- XF1: kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita
- XF2: kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet
- XF3: suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita
- XF4: suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet.

Pakkasrasitukselle alttiina olevat rakenteet luokitellaan rasitusluokkiin XF1 ja XF3. XF2 ja XF4 sen sijaan käsittävät rakenteet, jotka ovat pakkasrasituksen lisäksi alttiina suolalle. Tässä tutkimuksessa keskitytään varsinaiseen pakkasrapautumiseen, jolloin tarkasteltavana ovat rasitusluokissa XF1 ja XF3 olevat rakenteet. Betoninormiston by 68:n (2017, s. 38) mukaan nämä erotellaan keskenään rakenteen sijainnin ja rasituksen suuruuden perusteella. XF1 tulee kyseeseen pystyrakenteiden kohdalla sekä erityisen lievästi pakkasrasitetuilla vaakarakenteilla. XF3 sen sijaan yleensä käsittää pakkasrasitetut vaakarakenteet. (by 68 2017, s. 38)

Suunnittelija valitsee rasitusluokat ja mitoittaa rakenteen niiden mukaan tietylle ajanjaksolle. Rasitusluokkien valinnassa tulee kuitenkin välttää liian ankarien luokkien käyttöä, jotta rakennetta ei ylimitoiteta. Tämä voi johtaa liian kalliisiin tai hankalasti valmistettavissa oleviin rakenteisiin. (by 68 2017, s. 68)

Rasitusluokkia voidaan tarkastella myös betonin jäätymistavan näkökulmasta. Eroa betonin vaurioitumisen kannalta muodostuu siinä, jäätyykö betoni esimerkiksi tasaisesti joka puolelta vai pelkästään edestäpäin eli yhdeltä sivulta. (Kaufmann 1999, Janssen



et al. 1999, s. 73 mukaan) Tämän eron kannalta on määritelty erikseen käyttöikäskentää varten rasiusluokat XF1 ja XF3. Kuten aiemmin esitettiin, XF1-rasiusluokka käsittää pääsääntöisesti julkisivujen pystyrakenteita, joista vesi pääsee valumaan pois. Jäätymistavan erottelun kannalta tämä vastaa tapausta, jossa rakenne pääsee jääty-mään vain yhdeltä sivulta. Vastaavasti aikaisemman määrittelyn mukaisesti XF3-rasiusluokka kohdistuu pakkasrasitetuille vaakarakenteille, joista hyvänä esimerkkinä ovat parvekkeet. Parvekkeet ovat jatkuvasti märkänä, eikä vesi välttämättä pääse kulkeutu-maan pois rakenteelta. Veden jäädessä kellumaan rakenteen päälle rakenne altistuu kosteudelle kauttaaltaan, jolloin betonin jäätymisen voidaan katsoa tapahtuneen tasai-sesti joka puolelta.

### **2.3 Jäätymis-sulamisvaurioiden ehkäiseminen**

Aikaisemmin on tuotu ilmi, että betonin vesi-sementtisuhteella on suuri merkitys jäätymis-sulamisilmiöstä johtuvien vaurioiden esiintymisessä. Vesi-sementtisuhteen valitsemiseen vaikuttaa kuitenkin muutkin asiat, kuten rakenteen käytön ja -kuormien vaikutukset tai valun ja jälkihoidon huomioiminen. Tämän vuoksi sitä ei voida pitää varsinaisesti pakkasrapautumista ehkäisevänä tekijänä. Ehkäisykeinoja jäätymis-sulamisvaurioille kuitenkin löytyy, joista yleisesti käytetyin ja tehokkain on lisähuokostus. Pakkasrapautumista ei tälläkään voida täysin ehkäistä, mutta vaurioiden syntymisen hidastaminen on mahdollista.

Lisähuokostus tarkoittaa, että betonin valmistusvaiheessa seokseen lisätään lisähuokostusainetta, joka tuottaa betonin sisälle halkaisijaltaan kapillaarihuokosia suurempia suojahuokosia. Suojahuokokset ovat ilmatäytteisiä, eivätkä ne täyty vedellä kapillaarivoimien vaikutuksesta. Sen sijaan kapillaarihuokosten täytyessä vedellä osa vedestä purkautuu suojahuokosiin, jotka ehkäisevät veden tilavuuden suurenemisen kapillaarihuokosissa. Suojahuokosten välisen etäisyyden tulee kuitenkin olla riittävän pieni. Yleisesti pakkasrasituksen kannalta hyvänä keskinäisenä etäisyytenä suojahuokosille pidetään 0,20–0,25 mm. (by 42 2019, s. 26)

Alkuvaiheessa oleva pakkasrapautuminen voidaan todeta mikroskopoimalla ohut-hieestä tai mittaamalla betonin vetolujuus. Pitkälle edennyt rapautuminen voidaan nähdä jo silmin tai vasaroinnin avulla. Jälkikäteen pakkasrapautumista havaitessa ei voida enää vaikuttaa betonin materiaaliominaisuuksiin, mutta rasiustasoa voidaan alentaa ja rapautumista hidastaa pyrkimällä rajoittamaan kosteusrasitusta rakenteellisin keinoin. Tällaisia keinoja ovat muun muassa suojauksen järjestäminen sade- ja pinta-vesiä varten sekä parvekkeiden lasittaminen.

## 3. KÄYTTÖIKÄLASKENTAMALLIT JÄÄTYMIS-SULAMISRASITUKSESSA

Käyttöiällä tarkoitetaan aikaa, jonka rakennusosa täyttää sille asetetut vaatimukset todellisissa rasitusolosuhteissaan sekä normaalisti ylläpidettynä. Suomessa on vakiintuneet tavat betonirakenteen käyttöiän määrittämiselle. Rakenteen käyttöikä arvioidaan erikseen eri rasitusluokkien suhteen, jonka jälkeen lyhin käyttöikä valitaan määräväksi. Betonin käyttöikä voidaan mitoittaa kahdella eri tavalla; taulukkomitoituksella tai laskennallisella mitoituksella. Taulukkomitoitusta voidaan käyttää rakenteelle, jonka suunniteltu käyttöikä on 50 tai 100 vuotta. Taulukkomitoituksessa on määritetty enimmäis- ja vähimmäismäärät jokaiselle suunnitteluparametrille rasitusluokittain, mutta sen riskinä on mahdollinen rakenteen käyttöiän ylityminen, sillä käyttöiän optimointi rakenteelle on hankalaa. Laskennallista mitoitusta sen sijaan voidaan soveltaa niissä tapauksissa, kun käyttöikä suunnitellaan 50 ja 200 vuoden välille. (by 50 2012, s. 93) Laskennallinen mitoitus on Suomessa käytetty varsinainen käyttöikälaskentamalli, jota kutsutaan nimellä kerroinmenetelmä. Kyseistä laskentamallia voidaan hyödyntää kaikissa betonin rasitusluokissa. Suunnitellun käyttöiän saavuttaminen edellyttää kuitenkin säännöllisiä tarkastuksia sekä huoltokorjauksia lasketun käyttöiän aikana. (by 50 2012, s. 223)

Maailmalla käytetään erilaisia betonin käyttöikälaskentamalleja, joita on muodostettu erilaisissa ilmasto-olosuhteissa. Jäätymis-sulamissykliä aiheuttamaa vaikutusta rakenteen käyttöikälaskentaan on pyritty kehittämään paljon erityisesti Kiinassa, sekä lähestymään aihetta monista eri näkökulmista. Kiinan ympäristöolosuhteet ovat erilaiset verrattuna Suomen olosuhteisiin, mutta mallien pohjalta soveltaminen eri ympäristöön on mahdollista selvittäessä Suomen oloille vastaavat parametrit. Kiinan mallien välillä yhteistä on se, että käyttöiän pituutta on lähdetty tarkastelemaan betonin materiaaliominaisuuksien heikkenemisen kannalta. Seuraavissa alaluvuissa esitellään Suomen käytössä oleva kerroinmenetelmä sekä muita maailmalla tuotettuja käyttöikälaskentamalleja.

### 3.1 Kerroinmenetelmä

Kerroinmenetelmä perustuu siihen, että käytetään hyväksi vertailukäyttöikä, joka kerrotaan eri tekijöitä huomioivilla kertoimilla. Lisäksi rakenteen tulee täyttää halkeilun

osalta asetetut vaatimukset. (by 50 2012, s. 93) Yleinen kaava kerroinmenetelmälle on seuraavanlainen:

$$t_L = t_{Lr} * A * B * C * D * E * F * G, \quad (1)$$

jossa  $t_L$  on rakenteen käyttöikä,  $t_{Lr}$  on vertailukäyttöikä (50 vuotta) ja parametrit A-G erilaisia tekijöitä huomioonottavia käyttöiän kertoimia (by 50 2012, s. 223–224).

Eri rasitusluokilla ei välttämättä tarvita kaavassa 1 esiintyviä parametrejä. Pakkasrapautumisen näkökulmasta laskennassa ei esimerkiksi tarvita sisäilmaston tai käyttörasituksen huomioivia parametrejä betonirakenteen sijainnin vuoksi. Pakkasrapautumisen käsittävillä rasitusluokilla XF1 ja XF3 käyttöikä lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$t_L = t_{Lr} * A * B_1 * B_2 * C * E_1 * E_2 * G, \quad (2)$$

jonka parametrit A, B, C, E ja G ovat karkeasti määriteltä taulukossa 1.

**Taulukko 1:** Pakkaskestävyyteen vaikuttavat tekijät (by 50 2012, s.224)

Kerroin	Tekijä	Suunnitteluparametrit
A	Materiaalit, huokoisuus	Betonin ilmamäärä, vesi-sementtisuhte
B	Suunnittelu, rakenneyksityiskohdat	Rakennetyyppi, pinnoite
C	Työn suoritus	Jälkihoitoaika
D	Sisäilmasto	--
E	Ulkoinen säärasitus	Pakkasrasitusluokka, ilman suunta, rakennuksen sijainti
F	Käyttörasitus	--
G	Huoltoimenpiteet	Tarkastus- ja hoitoväli

Jokaiselle parametrille on olemassa omat taulukoinnit, laskukaavat tai suorat määritelmät. Suunnitteluparametrien määrittelyn osalta eroavaisuudet rasitusluokkien XF1 ja XF3 välille löytyvät kertoimen A suuruuksissa sekä ilmansuunnassa  $E_1$ , joka vaikuttaa vain rasitusluokkaan XF1. Näin ollen valittu rasitusluokka on oleellinen rakenteelle tehtävän käyttöikäsuunnittelun kannalta. Käyttöiän pituuden kannalta merkittävin on kerroin A, joka määritetään taulukosta betonin ilmamäärän ja vesi-sementtisuhteen avulla. (by 50 2012, s. 224–228) Myös kertoimeen  $E_2$  sisältyvä rakennuksen maantieteellinen sijainti vaikuttaa selkeästi käyttöikään, sillä siinä on huomioitu alueen keskimääräiset vuosittaiset jäätymis-sulamissykliä määrät. Kerrointen A ja E määrittäminen on esitetty kuvissa 2 ja 3.

Taulukko 2 Kertoimen A arvot rasitusluokassa XF1 (julkisivut). Tummennettua aluetta voidaan käyttää vain alitustapausten käsittelyssä.											
Ilmamäärä, %		Kerroin A									
Yläniemellisraja, mm		Tehollinen vesi-sementtisuhte									
8	12	>16	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
2,5	2,0	1,5	1,56	1,03	0,78	0,64	0,55	0,48	0,43	0,39	0,36
3,0	2,5	2,0	4,00	1,95	1,26	0,95	0,77	0,66	0,57	0,51	0,46
3,5	3,0	2,5	4,00	3,76	1,89	1,29	1,00	0,82	0,70	0,62	0,55
4,0	3,5	3,0	4,00	4,00	2,86	1,71	1,24	0,99	0,82	0,71	0,63
4,5	4,0	3,5	4,00	4,00	4,00	2,25	1,52	1,16	0,95	0,81	0,71
5,0	4,5	4,0	4,00	4,00	4,00	3,01	1,85	1,35	1,08	0,90	0,78
5,5	5,0	4,5	4,00	4,00	4,00	4,00	2,25	1,57	1,22	1,00	0,86
6,0	5,5	5,0	4,00	4,00	4,00	4,00	2,76	1,81	1,36	1,10	0,93
6,5	6,0	5,5	4,00	4,00	4,00	4,00	3,43	2,09	1,52	1,21	1,01
7,0	6,5	6,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,42	1,70	1,32	1,09
7,5	7,0	6,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,82	1,90	1,44	1,18
8,0	7,5	7,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,31	2,12	1,57	1,26
8,5	8,0	7,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,93	2,36	1,71	1,35
9,0	8,5	8,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,65	1,86	1,45
9,5	9,0	8,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,98	2,03	1,55
10	9,5	9,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,37	2,21	1,66

Taulukko 3 Kertoimen A arvot rasitusluokassa XF 3 (parvekkeet). Tummennettua aluetta voidaan käyttää vain alitustapausten käsittelyssä.											
Ilmamäärä, %		Kerroin A									
Yläniemellisraja, mm		Tehollinen vesi-sementtisuhte									
8	12	>16	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
2,5	2,0	1,5	1,04	0,69	0,52	0,43	0,36	0,32	0,29	0,26	0,24
3,0	2,5	2,0	3,12	1,30	0,84	0,63	0,52	0,44	0,38	0,34	0,31
3,5	3,0	2,5	4,00	2,51	1,26	0,86	0,66	0,55	0,47	0,41	0,37
4,0	3,5	3,0	4,00	4,00	1,91	1,14	0,83	0,66	0,55	0,47	0,42
4,5	4,0	3,5	4,00	4,00	3,08	1,50	1,01	0,77	0,63	0,54	0,47
5,0	4,5	4,0	4,00	4,00	4,00	2,00	1,23	0,90	0,72	0,60	0,52
5,5	5,0	4,5	4,00	4,00	4,00	2,77	1,50	1,04	0,81	0,67	0,57
6,0	5,5	5,0	4,00	4,00	4,00	4,00	1,84	1,21	0,91	0,74	0,62
6,5	6,0	5,5	4,00	4,00	4,00	4,00	2,28	1,39	1,02	0,81	0,67
7,0	6,5	6,0	4,00	4,00	4,00	4,00	2,91	1,61	1,13	0,88	0,73
7,5	7,0	6,5	4,00	4,00	4,00	4,00	3,85	1,88	1,26	0,96	0,78
8,0	7,5	7,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,21	1,41	1,05	0,84
8,5	8,0	7,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,62	1,58	1,14	0,90
9,0	8,5	8,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,16	1,77	1,24	0,97
9,5	9,0	8,5	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,91	1,99	1,35	1,03
10,0	9,5	9,0	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	2,25	1,47	1,11

**Kuva 2.** Kerroinmenetelmän kerroin A XF1 ja XF3 luokille. (by 50 2012, s. 224–225)

Kuvan 2 taulukoista valitaan käyttöikälaskennan kaavaan kerroin A käytettävän betonin ilmamäärän, rakeiden yläniemellisrajan sekä vesi-sementtisuhteen avulla. Kuvasta voidaan nähdä, että alhaisilla vesi-sementtisuhteilla käyttöikä betonirakenteelle saadaan melko suureksi. Taulukoissa vaalealla olevalla alueella ovat ne kertoimet, jotka kyseessä olevalle rasitusluokalle ovat sallitulla arvoalueella rakenteen kannalta. (by 50 2012, s. 224)

Kerroin E <sub>1</sub> pakkasenkestävyyden suhteen rasitusluokassa XF1.	
Ilmansuunta	E <sub>1</sub>
Pohjoinen (N)	2,0
Koillinen (NE)	1,7
Itä (E)	1,3
Kaakko (SE)	1,1
Etelä (S)	1,0
Lounas (SW)	1,0
Länsi (W)	1,2
Luode (NW)	1,6

Kerroin E <sub>2</sub> pakkasenkestävyyden suhteen rasitusluokissa XF1 ja XF3.	
Maantieteellinen sijainti	E <sub>2</sub>
Suomen merenannikkot	1,00
Keski-Suomi	1,10
Pohjois-Suomi	1,20

**Kuva 3.** Kerroinmenetelmän kertoimet E<sub>1</sub> ja E<sub>2</sub>. (by 50 2012, s. 228)

Kerroinmenetelmän kerroin B<sub>2</sub> määräytyy rakenteen pinnoitteen mukaan. Kertoimen arvo saadaan kuvan 4 mukaisesti.

Pinnoitekerroin B <sub>2</sub> .	
t <sub>Lp</sub> /t <sub>Rp</sub>	B <sub>2</sub>
≥1,6	2,00
1,5	1,91
1,4	1,79
1,3	1,66
1,2	1,54
1,1	1,42
1,0	1,30
0,9	1,20
0,8	1,12
0,7	1,06
0,6	1,03
<0,5	1,00

**Kuva 4.** Kerroinmenetelmän kerroin B<sub>2</sub> (by 50 2012, s. 226)

Kuvassa 4 näkyvistä parametreista  $t_{Lp}$  on pinnoitteen laskentakäyttöikä, joka riippuu pinnoitteen laadusta sekä betonin rasitusluokasta ja  $t_{Rp}$  on suunniteltu uudelleenpinnoituksen aikaväli. Molemmat näistä ovat vuosina. (by 50 2012, s. 226)

Muista parametreista  $B_1$  riippuu rakenteen massiivisuudesta, C jälkihoidon laadusta ja G rakenteen hoitovälistä. Nämä kertoimet määräytyvät kunkin osalta kahdesta vaihtoehdosta samankaltaisesti molemmilla rasitusluokilla XF1 ja XF3. (by 50 2012, s. 225–228)

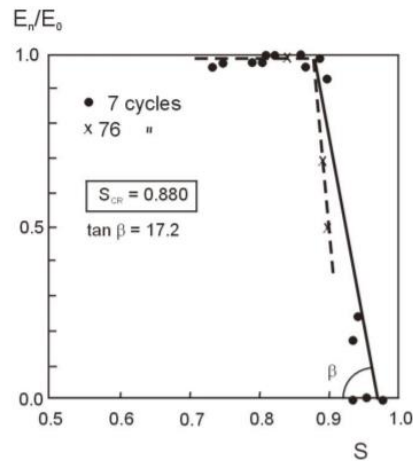
### 3.2 FIB 34 -käyttöikämalli

Fib 34 -käyttöikämalli perustuu Fagerlundin (2004) esittämään kriittisen kosteuspitoisuuden malliin, jonka pohjalta määritetään rakenteen kosteuspitoisuuden avulla vaikutus rakenteen käyttöikään. Kyseinen malli on kehitetty hyvin Suomen olosuhteita vastaavassa ympäristössä, mutta on kuitenkin runsaasti materiaaliominaisuuksien kannalta laboratoriotutkimuksia vaativa laskentamalli. Fib 34 -käyttöikämallin pohjana on seuraava kaava:

$$g(S_{CR}, S_{ACT}(t < t_{SL})) = S_{CR} - S_{ACT}(t < t_{SL}), \quad (3)$$

jossa  $S_{CR}$  on kriittinen kosteuden kyllästymisaste,  $S_{ACT}$  on todellinen kosteuden kyllästymisaste vuosimäärän hetkellä  $t$  ja  $t_{SL}$  on rakenteen suunniteltu käyttöikä vuosina, joka määräytyy kohteen käyttötarkoituksen mukaan. (Schiessl et al. 2006, s. 72–73)

Kriittinen kosteuden kyllästymisaste  $S_{CR}$  määritetään laboratoriotestien avulla tietylle betonilajille. Määrittystä varten hyödynnetään materiaalin dynaamista kimmomoduulia  $E$ . Mallin ideana on altistaa betoninäyte mahdollisimman todenmukaisissa olosuhteissa jäätymis-sulamissykleille. Näytteestä määritetään laboratoriossa dynaaminen kimmomoduuli ennen syklejä sekä niiden jälkeen. Kimmomoduulien välisen suhteen avulla saadaan määritettyä kriittinen kosteuden kyllästymisaste kuvassa 5 näkyvän esimerkin mukaisesti. (Schiessl et al. 2006, s. 73)



**Kuva 5.** Esimerkki kriittisen kosteuden kyllästymisasteen määrittämisestä kimmomoduulisuhteen avulla. (Fagerlund 2004, s.9)

Parametreistä  $E_n$  on näytteen dynaamisen kimmomoduulin arvo  $n$  määrän jäätymis-sulamissykliä jälkeen,  $E_0$  on materiaalin dynaamisen kimmomoduulin arvo ennen jäätymis-sulamissykliä aloittamista ja  $S$  kriittisen kosteuspitoisuuden arvo. Kriittinen kosteuspitoisuus saadaan siis seuraamalla dynaamisten kimmomoduulien suhdetta siihen pisteeseen, jossa kulmakerroin lähtee selkeään nousuun eli suhdeluku alkaa laskemaan merkittäväällä tahdilla. Tämä katkaisupiste antaa kyseisen betonin kriittisen kosteuden kyllästymisasteen. Arvo vaihtelee yleensä betonin ominaisuuksien mukaan lukujen 0,7 ja 1,0 välillä. (Schiessl et al. 2006, s. 73–74)

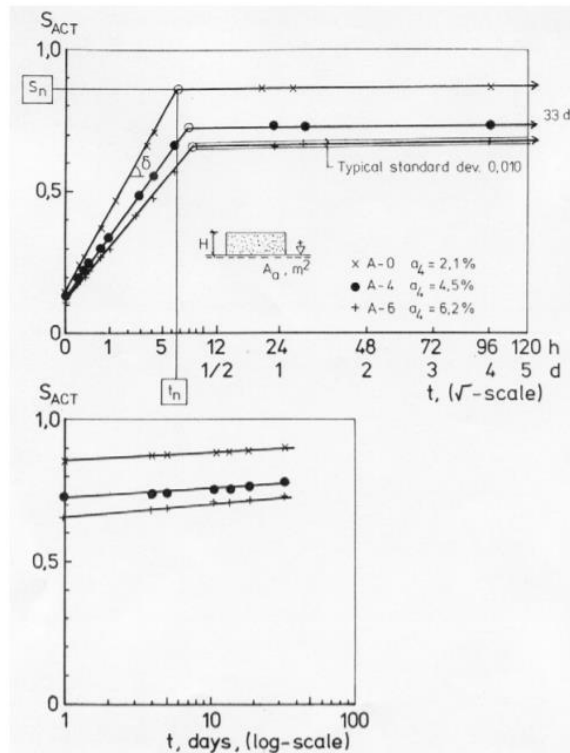
Toinen mallia varten määritettävä suure on rakenteen todellinen kosteuden kyllästymisaste  $S_{ACT}$  vuosimäärän hetkellä  $t$ . Todellinen kyllästymisaste jäätymis-sulamisrasituksessa lasketaan kaavalla 4:

$$S_{ACT}(t < t_{SL}) = S_n + e \cdot t_{eq}^d, \quad (4)$$

jossa  $t_{eq}$  on aika päivinä, jonka rakenne on märkänä kosteudelle altistuessaan ja  $S_n$ ,  $e$  sekä  $d$  materiaalista ja ajasta riippuvia parametrejä. Käytännössä suure  $t_{eq}$  huomioi myös betonin rasitusluokan, sillä arvo määritetään sen mukaan, onko kosteudelle altistuva rakenne vaaka- vai pystyasennossa. Lähtökohtaiset arvot suurelle ovat XF1-rasitusluokassa 1 viikko ja XF3-rasitusluokassa 4 kuukautta. (Schiessl et al. 2006, s. 75)

Kyllästymisasteen kaavassa 4, parametrit  $S_n$ ,  $e$  ja  $d$  huomioivat veden imeytymiskykyä tietyillä ominaisuuksilla varustetulle betonilaadulle rakenteen ollessa altistuneena vedelle. Suure  $S_n$  on jatkuvalle kosteudelle altistetun betonin kosteuden kyllästysaste. Piste  $S_n$  määritetään kuvaajasta ajan neliöjuuren funktiona, jossa kriittisen kyllästymisasteen tapaan tarkastellaan pistettä, jossa kuvaajan kulmakerroin muuttuu. Erona

tässä tapauksessa on, että määritetään kosteuden kyllästymisaste, jonka jälkeen ajan neliöjuuri ei enää merkittävästi muuta arvoa. (Schiessl et al. 2006, s. 76)



**Kuva 6.** Esimerkki parametrien  $S_n$ ,  $d$  ja  $e$  määrittämisestä (Fagerlund 2004, s.21)

Kuvassa 6 on esitetty esimerkki, jossa parametri  $S_n$  on määritetty kolmella erilaisella betonilaadulla. Kuvaajien avulla voidaan todeta, että  $S_n$  -arvo on suurin silloin, kun betonissa on jäännösilmaa mahdollisimman vähän. Tätä arvoa kuvaava parametri  $a$ .

Vastaavasti parametrit  $e$  ja  $d$  määritetään muuttamalla pisteen  $S_n$  jälkeinen kuvaaja logaritmiseksi, jonka jälkeen saadaan tietyn ajanhetken arvot betonilaadun mukaan. Käytännössä nämä parametrit kuvaavat veden imeytymisen kaltevuutta. (Schiessl et al. 2006, s. 76)

Fib 34 -käyttöikämalli perustuu vertailuun betonilaadun kriittisen kosteuden kyllästymispitoisuuden ja ajan hetkellä  $t$  vallitsevan todellisen kosteuden kyllästymispitoisuuden välillä. Tutkittavan ajan hetken  $t$  tulee aina olla suunniteltua käyttöikää pienempi, jolloin materiaalin ominaisuuksia sekä kosteuden laatua huomioivan  $S_{ACT}$ :in avulla saadaan selvitettyä, missä käyttöiän vaiheessa todellisuudessa rakenteen kosteus pitoisuus ylittää kriittisen pisteen. Tiedon myötä asiaan voidaan lähteä vaikuttamaan valitsemalla eri betonilaatu paremmilla materiaaliominaisuuksilla, mikäli eroavaisuus rakenteelle haluttuun käyttöikäan katsotaan liian suureksi.

Mallin heikkoutena on, että sen hyödyntäminen on hyvin hankalaa, sillä laskentakaavan käyttäminen vaatii monenlaisia kokeellisia määrittäyksiä erikseen kulloinkin käytettävästä betonilaadusta. Malli perustuu pitkälti betonin sisäiseen kosteuspitoisuuteen, joka riippuu betonin materiaalisista ominaisuuksista sekä kosteuden laadusta. Materiaaliominaisuuksista johtuvat parametrit määritetään tietyllä ajan hetkellä, mutta malli ei ota huomioon sitä, kuinka monta jäätymis-sulamissykliä ajan hetkeen mennessä on tapahtunut.

### 3.3 Lujuuden häviämisen malli

Li et al. (2016) esittävät laboratoriotestien pohjalta määritetyn rakenteen käyttöikä-laskentamallin, joka perustuu jäätymis-sulamissykliin aiheuttamaan betonin dynaamisen kimmokertoimen vähenemiseen sekä ympäristöolosuhteisiin. Kaava rakenteen käyttöiälle  $T$  on seuraava:

$$T = \frac{B \cdot N}{k \cdot M}, \quad (5)$$

jossa  $B$  on jäätymis-sulamiskokeen kerroin, joka suhteuttaa laboratorio-olosuhteissa suoritettua nopeaa jäätymis-sulamisyksikön vastaamaan luonnollisessa ympäristössä tapahtuvaa jäätymis-sulamisyksiköä. Yleensä kyseinen kerroin on asetettu arvoon 12, joka toisin sanoen on lukumäärä, jota yksi laboratoriossa tuotettu nopea jäätymis-sulamisyksikö vastaa luonnollisissa. Kaavan 5 parametri  $k$  on betonirakenteen suunnittelun turvakerroin, jota voidaan verrata Eurokoodin määrittelemiin osavarmuuskertoimiin, sillä sille on asetettu yleisesti arvo 1,5.  $N$  on jäätymis-sulamissykliin maksimi lukumäärä, jonka betonilaatu kestää ja  $M$  on keskimääräinen vuosittainen jäätymis-sulamisyksiköiden määrä, jolle betonirakenne altistuu luonnollisessa ympäristössä. (Li et al. 2016)

Jäätymis-sulamisyksikö tarkoittaa käytännössä sitä, kun rakenne on kertaalleen altistunut jäätymiselle eli lämpötila on laskenut alle 0 °C:een ja tämän jälkeen sulanut eli lämpötila on kohonnut takaisin yli 0 °C:een. Jäätymis-sulamisyksiköiden vuosittaista lukumäärää tilastoidaan alueittain ja näin ollen tietylle alueelle voidaan soveltaa keskimääräinen vuosittainen jäätymissulamisyksiköiden lukumäärä  $M$ . Suomen tapauksessa alueet voidaan jakaa karkeasti rannikkoalueeseen, sisämaahan ja Lappiin. Mittauspaikat edellä mainituilla sijaitsevat Helsinki-Vantaalla, Jyväskylässä sekä Rovaniemellä. (Pakkala et al. 2016, s. 37)

Jäätymis-sulamissykliin maksimi lukumäärä  $N$  on betonilaadusta riippuvainen suure. Shang et al. (2014) esittävät tutkimuksen, jossa kyseistä suuretta on tutkittu erilaisilla



betonilujuuksilla sekä ilmamääräpitoisuuksilla. Laboratoriossa suoritettua kokeen ideana on kuution muotoisen näytteen altistaminen nopeille jäätymis-sulamissykleille, jonka jälkeen mitataan näytteen puristuslujuutta tietyn syklimäärän jälkeen. Tämän myötä saadaan luotua yhteys jäätymis-sulamissykliä määrän ja puristuslujuuden vähenemisen välille tiettyä betonilaatua kohden. (Shang et al. 2014, s. 2) Suomen pakkasrasituskoestandardin mukaan betoni katsotaan vaurioituneeksi silloin, kun betonin puristuslujuus on laskenut 33 % alkuperäisestä lujuudesta (Leivo 2000).

### 3.4 Hydrostaattisen paineen malli

Hydrostaattisen paineen malli perustuu teoriaan, jonka mukaan betonin sisäisiin kapillaarihuokosiin päässyt vesi laajenee jäätyessään. Käyttökalaskennan osalta mallille ominaista on tutkia käytettävän betonilaadun dynaamisen kimmokertoimen ja vetolujuuden heikkenemistä jäätymis-sulamisyksiköiden määrän edetessä. Dynaamisen kimmokertoimen heikkenemisen huomioiminen käytössä tapahtuu materiaaliparametrilla  $\beta$ , jonka kaava on seuraava:

$$\beta = \frac{D_{N-1}}{\log N} \approx \frac{D_N}{\log N}, \quad (6)$$

jossa  $D_N$  kuvaa dynaamisen kimmokertoimen häviön määrää prosentuaalisesti. Mallin ideana on tutkia maksimaalista dynaamisen kimmokertoimen häviötä, jonka jälkeen betoni ei enää kestä jäätymis-sulamisrasitusta. Kiinan yleisen standardin mukaan  $D_N = 0,4$ , mutta Suomessa vastaavassa tapauksessa käytetään standardin SFS 5447 (1988) mukaan arvoa  $D_N = 0,25$ . Käytännössä tämä on siis kynnys, jolloin betonin dynaamisen kimmokertoimen arvo on 75 % siitä, mikä se oli ennen jäätymis-sulamisrasituksen aloittamista. Vastaavasti parametri  $N$  tarkoittaa jäätymis-sulamisyksiköiden lukumäärää, joka aiheuttaa kyseisen 25 %:n dynaamisen kimmokertoimen häviön. (Yu et al. 2017, s. 105–107)

Parametri  $\beta$  esiintyy kaavassa, joka määrittää betonin sisäisen suurimman vetojännityksen  $\sigma_{i,max}$  ja betonin vetolujuuden välisen suhteen. Pakkasrasitusta tarkasteltaessa suurin vetojännitys betonin sisäisesti muodostuu siinä vaiheessa, kun betonin kapillaarihuokosiin päässyt vesi laajenee suurimmilleen jäätyessään. Jännityksen huomioiminen on olennainen osa hydrostaattisen paineen mallia tarkasteltaessa. Jännityksen ja lujuuden suhde luonnollisessa ympäristössä jäätymis-sulamisyksikön aikana määritetään seuraavalla kaavalla:

$$\frac{\sigma_{i,max}}{f_{to}} = 1 - \beta \cdot \log N_i, \quad (7)$$

jossa  $f_{t0}$  on betonin vetolujuus ennen jäätymis-sulamisrasitusta ja  $N_i$  betonin väsymisaika jäätymis-sulamisrasituksessa silloin, kun rakenne altistuu jännitykselle  $\sigma_{i,max}$ . (Yu et al. 2017, s. 111)

Laboratoriossa tehtävien tutkimusten soveltaminen luonnon oloissa tapahtuvaan jäätymis-sulamisrasitukseen tapahtuu parametrin  $k$  avulla:

$$k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{i,max}} = \frac{1-\beta \cdot \log N}{1-\beta \cdot \log N_i}, \quad (8)$$

jossa  $k$  on suhdeluku laboratoriossa tuotetun jäätymis-sulamisjakson aiheuttaman betonin sisäisen suurimman vetojännityksen  $\sigma_{max}$  ja luonnollisessa ympäristössä tapahtuvan jakson aiheuttaman betonin sisäisen suurimman vetojännityksen  $\sigma_{i,max}$  välillä. Laboratoriossa tuotetun rasituksen aiheuttaman vetojännityksen kaava on siis vastaavanlainen kuin luonnollisessa ympäristössä, mutta logaritmissa parametri  $N$  on vakio, samaan tyyliin kuin alaluvussa 3.3 kaavan 5 osalta on esitetty. (Yu et al. 2017, s. 111)

Kaavasta 8 saadaan ratkaistua jäätymis-sulamisrasituksessa jännitykselle  $\sigma_{i,max}$  altistuneen betonin väsymisaika  $N_i$  seuraavasti:

$$N_i = 10^{\frac{k+\beta \cdot \log N-1}{\beta \cdot k}}, \quad (9)$$

Kaavaan 9 sijoitetaan parametri  $\beta$  kaavan 6 mukaisesti, jolloin Suomen standardien mukainen  $N_i$  saadaan muotoon:

$$N_i = N^{\frac{k-0,75}{0,25 \cdot k}}. \quad (10)$$

Hydrostaattisen paineen teoriaan perustuen, betonin jäätyminen aiheuttama suurin hydrostaattinen paine on suoraan verrannollinen jäähdytysnopeuteen ja jäätymisasteeseen. Tämän myötä maksimaalisen vetojännityksen suhde  $k$  voidaan esittää seuraavasti:

$$k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{i,max}} = \frac{\theta_t}{\theta_{i,t}} = -\frac{0,22}{\theta_{i,t}}, \quad (11)$$

jossa  $\theta_t$  edustaa jäähdytysnopeutta ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , negatiivinen) laboratorio-olosuhteiden jäätymis-sulamissyklin standardinopeudelle ja  $\theta_{i,t}$  vastaavasti jäähdytysnopeutta ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , negatiivinen) tietyssä luonnollisessa ympäristössä tapahtuvassa jäätymis-sulamisympäristelmässä. Parametrin  $\theta_{i,t}$  arvo on siis ympäristön olosuhteista riippuvainen suure, joka määritellään alueittain. Pigeonin & Pleaun (1995, s. 190) mukaan  $\theta_{i,t}$  on yleensä

0,5-2,0 °C/h eli noin 0,008-0,033 °C/min. Sijoittamalla  $k$  kaavaan 10, saadaan suurelle  $N_i$  yksinkertaistettu muoto:

$$N_i = N \frac{0,22+0,7 \cdot \theta_{i,t}}{0,055}. \quad (12)$$

Tällä mallilla saadaan laskettua vedelle altistuneelle tietylle betonille ominainen väsymisikä jäätymis-sulamisrasituksessa tietyissä luonnollisissa olosuhteissa. Lopulta väsymisiän  $N_i$  laskemiseksi tarvitaan siis betonilaadun kestävä maksimi jäätymis-sulamisjaksojen lukumäärä  $N$  sekä ympäristölle ominainen jäähdytysnopeus  $\theta_{i,t}$ . (Yu et al. 2017, s. 111–112)

Varsinaisen betonin käyttöiän laskemiseksi hydrostaattisen paineen mallissa huomioidaan mahdollisimman tarkasti lämpötila, jossa kapillaarihuokosissa oleva vesi todellisuudessa jäätyy. Tämän myötä on kehitetty väsymisikäkertymä, jossa otetaan huomioon erilaiset jäätymis-sulamisjärjestelmät. Luonnollisten ympäristöolosuhteiden mukaisilla jäätymis-sulamisjärjestelmillä laskettua ennustettua käyttöikää nimitetään kumulatiiviseksi ennustusmalliksi. Mallin mukaan betonin luonnollinen käyttöikä  $N_{year}$  määritetään seuraavalla kaavalla:

$$\frac{1}{N_{year}} = \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} + \dots + \frac{1}{N_i} + \dots + \frac{1}{N_{m-1}} + \frac{1}{N_m} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{N_i}. \quad (13)$$

Kaavan 13 mukainen väsymisikäkertymä huomioi hyvin tarkasti jäätyvän veden aiheuttamaa painetta betonissa, mutta kaavan hyödyntäminen on työlästä. Oikeassa ympäristössä ja oikeilla lähtötiedoilla hydrostaattisen paineen mallin avulla saadaan todennäköisesti tarkkaa informaatiota betonirakenteen käyttöiästä, sillä malli sisältää monenlaisia huomioitavia tekijöitä.

## 4. KÄYTTÖIKÄLASKENTAMALLIEN VERTAILU

Kerroinmenetelmään verrattuna muut tutkimuksessa löydetyt käyttöikälaskentamallit ovat hyvin erilaisia. Eroja löytyy laskentaan käytettävistä suureista sekä mallien käytännöllisyydestä. Seuraavissa alaluvuissa vertaillaan tutkimuksessa käsiteltyjä betonin käyttöikälaskentamalleja sanallisesti eri näkökulmista. Lähtökohtaisesti vertailu toteutetaan kerroinmenetelmän ja muiden luvussa 3 esitettyjen mallien välillä.

### 4.1 Mallien sisältö

Sisältönsä puolesta kerroinmenetelmä on melko yksinkertainen, sillä kertoimet ovat yksiselitteisesti määritelty betoninormissa. Kertoimet riippuvat betonin materiaaliominaisuuksista ja ympäristöolosuhteista. Materiaalin kannalta merkittävässä osassa ovat vesi-sementtisuhde sekä betonin ilmamäärä, jotka kerroinmenetelmä huomioi suoraan. Muissa malleissa näin ei ole, vaan huomion kohteena on betonin lujuus, johon edellä mainitut ominaisuudet vaikuttavat. Muut mallit tarkkailevat betonin lujuuden menettämistä tietyillä materiaaliominaisuuksilla jäätymis-sulamissykliä määrän kasvaessa.

Ympäristöolosuhteiden kannalta kerroinmenetelmää ei voi sanoa kovin tarkaksi. Kertoimissa ei esimerkiksi oteta huomioon jäätymis-sulamissykliä määrää suoranaisesti, vaan määrä on upotettu maantieteellisen sijainnin kertoimeen. Tämän kertoimen osalta arvot vaihtelevat vain vähän, kuten alaluvun 3.1 kuvasta 3 nähdään. Toki Suomessa syklimäärien vaihtelevuus eri alueilla ei kovin suurta olekaan, mutta kyseiseen kertoimeen sisältyy tämän lisäksi muutakin, jonka myötä määrittely on epätarkkaa. Myöskään kriittiseen kosteuspitoisuuteen perustuva Fib 34 -malli ei huomioi jäätymis-sulamissykliä lukumäärää suoranaisesti. Epäsuora vaikutus niiden osalta näkyy kriittisen kosteuden kyllästymispitoisuuden määrittämisessä alaluvussa 3.2 esiintyvän kuvan 5 mukaisesti, jossa jäätymis-sulamissykliä avulla pyritään löytämään kosteuspitoisuus, jolloin betonin lujuus romahtaa. Sen sijaan lujuuden häviämisen mallissa sekä hydrostaattisen paineen mallissa tietyn betonilaadun kestävä jäätymis-sulamissykliä määrä löytyy betonin käyttöikä kaavasta, niin kuin kaavoista 5 ja 12 nähdään.

Käyttöikämallien sisältöä voidaan vertailla myös rasitusluokkien näkökulmasta. Kerroinmenetelmässä rasitusluokat ovat keskeisessä roolissa ja vaikuttavat suuresti betonirakenteen käyttöikänsä. Rasitusluokan valinta tehdään rakenteen sijainnin mukaan ja näkyy suoraan joidenkin kertoimien valinnassa. Fib 34-malli huomioi betonin rasitusluokan kaavassa 4. Mallissa ero XF1 ja XF3 luokkien välillä tulee vakioksi määritellyissä

betonin kuivumisnopeuksissa rakenteen erilaisilla sijainneilla. Lujuuden häviämisen ja hydrostaattisen paineen mallit ovat tässäkin suhteessa erilaisia, sillä malleissa ei huomioida rakenteen sijaintia eikä tätä kautta myöskään betonin rasitusluokkia.

## 4.2 Mallien käytännöllisyys

Malleja voidaan vertailla keskenään myös niiden käytännöllisyyden näkökulmasta. Kerroinmenetelmän etuina on helppokäyttöisyys sekä sen kohdistuminen suoraan käyttöön. Tämä selittää osaltaan, miksi kerroinmenetelmä on vakiintunut käyttöikälaskentamalli Suomessa. Kerroinmenetelmän käytäntöön suuntautuminen näkyy siinä, että kaavasta löytyy omat kertoimet myös jälkihoidolle ja hoitovälille. Kolme muuta mallia ovat tähän verrattuna selvästi teoreettisempia. Lisäksi ne pohjautuvat vahvasti laboratorio-kokeisiin. Jokainen malleista kuitenkin on käytännöllinen, mikäli riittävät lähtötiedot vain ovat saatavilla.

Laskennallisen vertailun osalta mallien erilaisuus tuottaa suuria ongelmia. Fib 34 -käyttöikämallin varsinainen heikkous tässä suhteessa on mallin tarvitsemat laboratoriotutkimukset. Hydrostaattisen paineen mallin osalta laskennallisen vertailun kerroinmenetelmään tekee erittäin haastavaksi se, että malli on kehitetty Kiinassa hyvin erilaisissa olosuhteissa ja mallin toimivuus on varmistettu käyttäen sellaisia betonilaatuja, joita Suomessa ei ole käytössä. Lisäksi näiden vastaavuutta joihinkin Suomen betonilaatuihin ei voida todeta varmaksi. Hydrostaattisen paineen malli ei myöskään ole kovin yksinkertainen, sillä väsymisikäkertymä huomioon otettaessa, laskennasta tulee hyvin tarkkaa ja monivaiheista. Sen sijaan lujuuden häviämisen mallin tapauksessa vertailu laskennallisesti kerroinmenetelmän kanssa on mahdollista. Laskentakaavat sisältävät erilaisia suureita ja tämäkin malli on tuotettu betoneille, joita Suomessa ei ole käytössä. Kuitenkin lujuuden häviämisen mallin ollessa melko yksinkertainen, voidaan suuntaa antavaa vertailua suorittaa tietyille betonilaadulle tietyssä ympäristössä.

## 5. LASKENTAESIMERKIT

Alaluvussa 4.2 käsiteltiin tutkimuksessa löydettyjen käyttöikälaskentamallien käytännöllisyyttä, sekä niiden laskennallisen vertailun mahdollisuutta. Mallien käsittelyn seurauksena selvisi, että kerroinmenetelmän kanssa ainoa laskennallisen vertailun jollain tasolla mahdollistava käyttöikämalli on lujuuden häviämisen malli. Tämän myötä luotiin tapaus, jossa määriteltynä on maantieteellinen sijainti sekä betonirakenteen ominaisuudet. Tapauksessa käytettävä betoni on taulukon 2 mukainen.

**Taulukko 2: Laskentaesimerkin betonin ominaisuudet**

<b>Käytettävä betoni:</b>		C30/37	
Vesi-sementtisuhte	v/s	0,5	
Ylänimellisraja	D	12	mm
Ilmamäärä	a	5,0	%

Laskentaesimerkin tapauksessa rakenteen sijainniksi määritellään Sisä-Suomi, tarkemmin kohdennettuna Jyväskylä.

Lujuuden häviämisen malli on muodostettu raskaille rasitukselle, joissa rakenteeseen vaikuttaa kemikaalisia aineita. Mallia pystyy kuitenkin soveltamaan myös pelkälle pakkasrasitukselle, sillä tässä suhteessa vaikuttavana tekijänä on ainoastaan jäätymissulamissyklien lukumäärä, jonka betoni kestää. Koska malli on tuotettu raskaammille rasitusluokille, voidaan sen katsoa toimivan paremmin XF3-rasitusluokassa. Tämän vuoksi luodaan varsinainen vertailu kerroinmenetelmään XF3-rasitusluokassa, mutta lasketaan käyttöikä samoilla lähtötiedoilla myös XF1-rasitusluokassa kerroinmenetelmän avulla.

XF1-rasitusluokassa kerroinmenetelmällä saadaan laskettua käyttöikä taulukon 3 mukaisesti. Laskelmissa oletetaan, että käytetyn pinnoitteen käyttöikä ja pinnoitteen uusimisväli ovat samoja, eikä niiden laskemiseen perehdytä tarkemmin. Lisäksi rakenne ei ole erityisen massiivinen, jälkihoito on määräysten mukaista ja hoitoväli pidetään tiheänä.

**Taulukko 3: Kerroinmenetelmä rasitusluokassa XF1.**

Nimi	Suure	Arvo	Yksikkö	Selite
<b>XF1:</b>				
Vertailukäyttöikä	$t_{Lr}$	50	a	
Betonin ilmamäärä & v/s-suhde	A	2,25		Taulukko 2, s.224, by50
Rakenteen massiivisuus	$B_1$	1,0		Muut rakenteet
Pinnoite	$t_{Lp}/t_{Rp}$	1,0		Käyttöikä/uudelleen pinnoitus
	$B_2$	1,3		Taulukko 5, s.226, by50
Jälkihoito	C	1,0		Määräysten mukaiset jälkihoidot
Ilmansuunta	$E_1$	1,2		Taulukko 7, s.228, by50, Länsi
Maantieteellinen sijainti	$E_2$	1,10		Taulukko 8, s.228, Keski-Suomi
Tarkastus- ja hoitoväli	G	1,0		1-2 vuoden välein
<b>Käyttöikä</b>	<b><math>t_L</math></b>	<b>193</b>	<b>a</b>	$t_L = t_{Lr} * A * B_1 * B_2 * C * E_1 * E_2 * G$

Seuraavaksi samoilla lähtöarvoilla ja oletuksilla lasketaan käyttöikä rasitusluokassa XF3. Tämä laskelma on esitetty taulukossa 4.

**Taulukko 4: Kerroinmenetelmä rasitusluokassa XF3.**

Nimi	Suure	Arvo	Yksikkö	Selite
<b>XF3:</b>				
Vertailukäyttöikä	$t_{Lr}$	50	a	
Betonin ilmamäärä & v/s-suhde	A	1,50		Taulukko 2, s.224, by50
Rakenteen massiivisuus	$B_1$	1,0		Muut rakenteet
Pinnoite	$t_{Lp}/t_{Rp}$	1,0		Käyttöikä/uudelleen pinnoitus
	$B_2$	1,3		Taulukko 5, s.226, by50
Jälkihoito	C	1,0		Määräysten mukaiset jälkihoidot
Maantieteellinen sijainti	$E_2$	1,10		Taulukko 8, s.228, Keski-Suomi
Tarkastus- ja hoitoväli	G	1,0		1-2 vuoden välein
<b>Käyttöikä</b>	<b><math>t_L</math></b>	<b>107</b>	<b>a</b>	$t_L = t_{Lr} * A * B_1 * B_2 * C * E_1 * E_2 * G$

Taulukoiden 3 ja 4 avulla voidaan havaita, että käyttöikä laskee merkittävästi rasitusluokkien välillä. Taulukko 3 kuvaa pystysuuntaisen julkisivurakenteen käyttöikä ja taulukko 4 parvekerakenteen käyttöikä samassa ympäristössä.

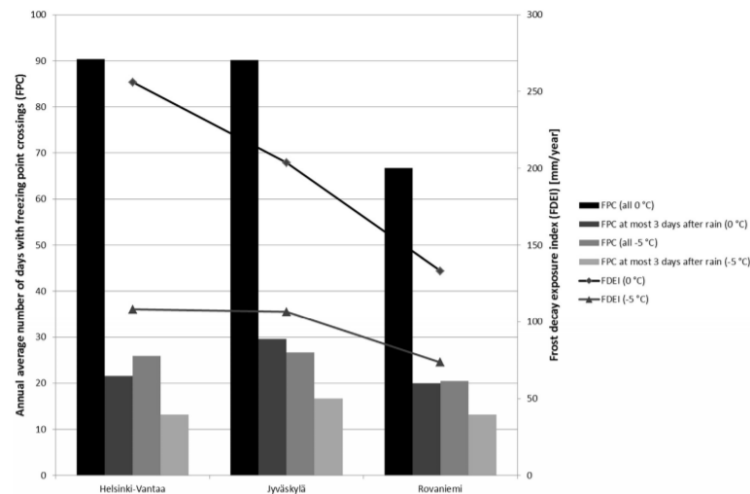
Lujuuden häviämisen mallia verrataan taulukon 4 mukaiseen tulokseen. Kaavaa 5 varten tarvitaan parametrit  $N$  ja  $M$ . Parametri  $N$  on jäätymis-sulamissykliä lukumäärä tietylle betonille ja se saadaan tapauksessa käytetylle betonilaadulle karkeasti määritettyä kuvasta 7, jossa esitetään tietyn betonilaadun lujuuden häviämistä jäätymis-sulamissykliä lukumäärän edetessä.

	Number of fast freeze-thaw cycles							
	0	50	100	150	200	300	350	400
C50	55.98	54.12	54.20	52.33	53.62	47.92	45.80	38.85
C40	42.80	42.70	39.86	39.11	37.79	34.38	32.61	24.88
C30	34.20	33.40	31.67	27.60	26.38	21.10	19.13	16.22
C25	28.70	27.00	26.30	22.28	20.82	14.50	/	/
C20	23.60	23.20	22.07	20.80	17.60	10.21	/	/

**Kuva 7.** Lujuuden määrä eri betonilaaduilla jäätymis-sulamissykliä jälkeen (Shang et al. 2014, s. 3)

Kuvan 7 mukaisia arvoja hyödyntäen saadaan parametri  $N$ , kun C30 betonin puristuslujuus on vähentynyt 33%, kuten aluvuossa 3.3 esitettiin. Kuvan 7 perusteella todetaan, että betoni kestää 300 jäätymis-sulamissykliä ennen vaurioitumistaan.

Parametri  $M$  sen sijaan saadaan kuvasta 8, jossa on esitetty vuosittaisten jäätymis-sulamissykliä määrät Suomen eri alueilla.



**Kuva 8.** Jäätymis-sulamissykliä vuosittaiset määrät Suomen eri alueilla. (Pakkala et al. 2014, s. 37)

Kuvassa 8 mustat palkit kuvaavat, kuinka monta kertaa alueella vuosittain lämpötila ylittää 0 °C vuosittain. Jyväskylässä luku on 90, jolloin jäätymis-sulamissyklejä tapahtuu keskimäärin vuodessa 45.

Edellä määritettyjen arvojen avulla saadaan betonin käyttöikä lujuuden häviämisen mallia hyödyntäen laskettua taulukon 5 mukaisesti.

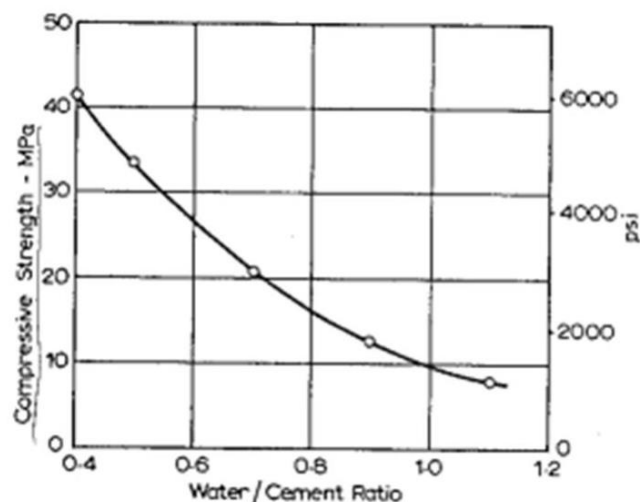


**Taulukko 5: Lujuuden häviämisen malli rasisitusluokassa XF3.**

Nimi	Suure	Arvo	Yksikkö	Selite
<b>Lujuuden häviämisen malli (XF3)</b>				
Suhteutus laboratorio vs luonnollinen ympäristö	B	12		Li et al.
Syklit ennen vaurioitumista	N	300	sykliä	Shang et al.
Turva-/osavarmuuskerroin	k	1,5		Li et al.
Vuosittaiset syklit ympäristössä	M	45	sykliä/a	90/2, Pakkala et al.
	<b>T</b>	<b>53</b>	<b>a</b>	$T=B*N/k*M$

Vertaamalla taulukon 5 tulosta taulukon 4 tulokseen voidaan huomata, että lujuuden häviämisen mallin avulla laskettu käyttöikä on jopa puolet pienempi kuin kerroinmenetelmällä laskettu käyttöikä. Tämän myötä voidaan todeta, että lujuuden häviämisen malli ei välttämättä sovellu Suomessa käytettäville betonilaaduille, mutta ainakin laskennan tulos on reilusti varman puolella.

Laskennallisen vertailun osalta todettiin, että kerroinmenetelmä ja lujuuden häviämisen malli eivät suoraan vastaa toisiaan. Tämän myötä tehdään vielä toinen vertailu, jossa tutkitaan, kuinka paljon betonilaadun muuttaminen suhteessa vaikuttaa kummallakin mallilla betonirakenteen käyttöikään XF3-rasisitusluokassa. Lujuuden häviämisen mallissa betonin lujuusluokka vaikuttaa käyttöikään suoraan, kun taas kerroinmenetelmässä vaikuttavana tekijänä betonilaadun kannalta on vesi-sementtisuhte. Toisessa vertailussa muutetaan käytettäväksi betoniksi C40/45. Karkea suhde betonin puristuslujuuden ja vesi-sementtisuhteen välille saadaan kuvan 9 avulla.



**Kuva 9.** Puristuslujuuden ja vesi-sementtisuhteen välinen suhde. (Neville 1995, s. 271)

C40 betonille puristuslujuus ennen jäätymis-sulamissyklejä kuvan 7 mukaan on noin 43 MPa. Kuvan 9 kuvaajan avulla voidaan arvioida, että tällöin vesi-sementtisuhte on noin

0.4. Laskelmien osalta tässä tilanteessa kerroinmenetelmässä muuttuu vesisementtisuhteen muuttumisen myötä kerroin A. Oletetaan betonin ilmamäärä ja rakeiden ylänimellisraja samaksi kuin C30/37 betonilla. Uusi tulos esitetään taulukossa 6.

**Taulukko 6: Kerroinmenetelmä rasitusluokassa XF3, C40/50.**

Nimi	Suure	Arvo	Yksikkö	Selite
<b>XF3:</b>				
Vertailukäyttöikä	$t_{Lr}$	50	a	
Betonin ilmamäärä&v/s-suhde	A	4,00		Taulukko 2, s.224, by50
Rakenteen massiivisuus	$B_1$	1,0		Muut rakenteet
Pinnoite	$t_{Lp}/t_{Rp}$	1,0		Käyttöikä/uudelleen pinnoitus
	$B_2$	1,3		Taulukko 5, s.226, by50
Jälkihoito	C	1,0		Määräysten mukaiset jälkihoidot
Maantieteellinen sijainti	$E_2$	1,10		Taulukko 8, s.228, Keski-Suomi
Tarkastus- ja hoitoväli	G	1,0		1-2 vuoden välein
<b>Käyttöikä</b>	<b><math>t_L</math></b>	<b>286</b>	<b>a</b>	$t_L = t_{Lr} * A * B_1 * B_2 * C * E_1 * E_2 * G$

Taulukosta 6 voidaan nähdä, että käyttöikä suurenee paljon, kun käytetään lujempaa ja sitä kautta myös tiiviimpää betonia. Sama tilanne esitetään lujuuden häviämisen mallille taulukossa 7.

**Taulukko 7: Lujuuden häviämisen malli rasitusluokassa XF3, C40/50.**

Nimi	Suure	Arvo	Yksikkö	Selite
<b>Lujuuden häviämisen malli (XF3)</b>				
Suhteutus laboratorio vs luonnollinen ympäristö	B	12		Li et al.
Syklit ennen vaurioitumista	N	375	sykliä	Shang et al.
Turva-/osavarmuuskerroin	k	1,5		Li et al.
Vuosittaiset syklit ympäristössä	M	45	sykliä/a	90/2, Pakkala et al.
	<b>T</b>	<b>67</b>	<b>a</b>	$T = B * N / k * M$

Taulukosta 7 nähdään, että myös lujuuden häviämisen mallilla laskettaessa käyttöikä nousee, sillä jäätymis-sulamissykliä määrä ennen vaurioitumista kasvaa. Kuitenkaan ero ei ole läheskään samankaltainen kuin kerroinmenetelmän tapauksessa. Lujuuden häviämisen malli ei huomioi betonin tiiveyttä, mikä osaltaan selittää suhteellisen suuren eron kerroinmenetelmään. Laskelmat antavat vahvistusta sille, että lujuuden häviämisen malli ei ainakaan XF3-rasitusluokassa ole verrannollinen kerroinmenetelmään, eikä kovinkaan luotettava käyttöikä laskentaa varten.

Toisesta näkökulmasta katsottuna, voidaan todeta, että kerroinmenetelmä ei välttämättä ole kovinkaan varma. Käyttöiän suuruus kasvaa todella huomattavasti vesisementtisuhteen pienentyessä, ja kuten alaluvun 3.1 kuvasta 2 nähdään, kerroin A on ar-

vossa 4 melko monessa tapauksessa. Kertoimiin ei todennäköisesti ole sisällytetty varmuuskertoimia, eikä sellaisia myöskään käytetä kerroinmenetelmän kaavassa. Vertailun kohteena olevassa lujuuden häviämisen mallistakin löytyy betonirakenteen suunnittelun turvakerroin  $k$ . Laskelmienkin osalta lujuuden häviämisen mallin tulokset ovat selvästi varmemman puolella.

Suoritetaan lujuuden häviämisen mallilla vielä yksi laskelma vesi-sementtisuhteella, jota ei Suomen oloissa voida käyttää XF3-rasitusluokassa. Käytetään vesi-sementtisuhdetta 0,6, jolloin kuvan 9 mukaan puristuslujuus on noin 27 MPa. Tämän voidaan katsoa vastaavan betonin C25/30 lujuutta. Kuvan 7 perusteella betoni kestää noin 230 jäätymis-sulamissykliä ennen vaurioitumista. Lujuuden häviämisen mallilla laskettu käyttöikä esitetään taulukossa 8.

**Taulukko 8: Lujuuden häviämisen malli rasitusluokassa XF3, C25/30.**

Nimi	Suure	Arvo	Yksikkö	Selite
<b>Lujuuden häviämisen malli (XF3)</b>				
Suhteutus laboratorio vs luonnollinen ympäristö	B	12		Li et al.
Syklit ennen vaurioitumista	N	230	sykliä	Shang et al.
Turva-/osavarmuuskerroin	k	1,5		Li et al.
Vuosittaiset syklit ympäristössä	M	45	sykliä/a	90/2, Pakkala et al.
	<b>T</b>	<b>41</b>	<b>a</b>	$T=B*N/k*M$

Tällä vesi-sementtisuhteella ei siis periaatteessa voitaisi tehdä Suomen oloissa pakkasenkestävää rakennetta. Kolmen laskelman jälkeen voidaan todeta, että lujuuden häviämisen mallilla laskettaessa käyttöiän suuruus laskee lähestulkoon lineaarisesti betonilaadun heiketessä. Kaiken kaikkiaan mallia ei voida pitää kovin luotettavana, sillä ainoa vaikuttava tekijä on betonin lujuus, ja käyttöiän suuruus ei merkittävästi laske, vaikka betonin ei pitäisi olla pakkasenkestävää.

## 6. YHTEENVETO

Tässä työssä oli tarkoituksena löytää erilaisia betonin käyttöikälaskentamalleja jääty-mis-sulamisrasituksessa, sekä vertailla näitä malleja entuudestaan tunnettuun ja Suo-messa käytettävään kerroinmenetelmään. Käyttöikälaskentamalleja pyrittiin löytämään XF1- ja XF3-rasitusluokkiin. Kirjallisuustutkimuksen tuotoksena löytyi kolme muuta mal-li: fib 34 -käyttöikämalli, lujuuden häviämisen malli ja hydrostaattisen paineen malli. Työssä havaittiin monesta näkökulmasta, että nämä mallit eroavat selkeästi kerroinme-netelmästä.

Vertailua suoritettiin kerroinmenetelmän ja muiden mallien välillä sisällön ja käytännölli-syyden näkökulmista. Huomioitavina asioina voidaan nostaa, että muut mallit ottavat ympäristötekijöitä huomioon tarkemmin kuin kerroinmenetelmä. Toisaalta muut mallit pohjautuvat vahvasti laboratoriotutkimuksiin, joka tekee laskennallisesta vertailusta ker-roinmenetelmään hankalaa. Karkea laskennallinen vertailu pystyttiin kuitenkin suoritta-maan kerroinmenetelmän ja lujuuden häviämisen mallin välillä.

Vertailemalla erilaisia käyttöikälaskentamalleja voidaan havaita, että kerroinmenetelmä ei ehkä ole tarkin mahdollinen laskennallinen menetelmä. Tästä huolimatta kerroinme-netelmä soveltuu jääty-mis-sulamisrasitukselle altistuneen betonirakenteen käyttöiän laskentaan erilaisissa tapauksissa. Lisäksi kerroinmenetelmä on helppokäyttöinen ja suunnattu suoraan käytäntöön, jonka vuoksi se on oikein pätevä betonin käyttöiän mi-toitukseen. Muut mallit vaativat hyvin erilaisia lähtötietoja ja ovat tuotettu erilaisissa olo-suhteissa. Ne ovat kuitenkin hyödynnettäviä tietynlaisissa tapauksissa, mutta eivät vält-tämättä tällä hetkellä Suomen olosuhteissa tai Suomessa käytettävillä betoneilla. Kai-ken kaikkiaan tutkimuksen avulla saatiin mielenkiintoista pohjatietoa aiheeseen liittyviä tulevaisuuden tutkimuksia varten.

## LÄHTEET

by 42 (2019). *Betonijulkisivun kuntotutkimus*. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 136 s.

by 68 (2017). *Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu: opas suunnittelijoille*. Punkki, J. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 95 s.

by 50 (2012). *Betoninormit*. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki. 251 s.

Janssen, D., Setzer, M. & Snyder, M. (1999). *Frost Damage in Concrete*. RILEM Publications s.a.r.l. Paris. 297 p.

Schiessl, P., Bamforth, P., Baroghel-Bouny, V., Corley, G., Faber, M., Forbes, J., Gehlen, C., Helene, P., Helland, S., Ishida, T., Markeset, G., Nilsson, L., Rostam, S., Siemes, A. & Walraven, J. (2006). *Model Code for Service Life Design*. International Federation for Structural Concrete (fib). Lausanne. 116 p.

Li, G., Wang, D. & Du, J. (2016). *Deterioration and Service Life Prediction of Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycles in  $Na_2SO_4$  Solution*. American Journal of Civil Engineering. Vol. 4(3), 104–110 p.

Fagerlund, G. (2004). *A service life model for internal frost damage in concrete, report TVBM3119, Div of Building Materials*, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden. 138 p.

Pakkala, T., Köliö, A., Lahdensivu, J. & Kiviste, M. (2014). *Building and Environment 82*. Tampere University of Technology, Tampere, Finland. 27–41 p.

Shang, H., Cao, W. & Wang, B. (2014). *Effect of Fast Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Properties of Ordinary-Air-Entrained Concrete*. The Scientific World Journal. China. 7 p.

Leivo, M. (2000). *Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen, Osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Espoo. 38 s.

Yu, H., Ma, H. & Yan, K. (2017). *Construction and building materials 137, An equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete and a model for predicting the service life*. Nanjing, China. 104–116 p.

SFS 5447. (1988). *Sisältyy julkaisuun: SFS-käsikirja 156 (2010)*. Suomen Standardoimisliitto. Helsinki. 318 s.

Pigeon, M. & Pleau, R. *Durability of concrete in cold climates*. Suffolk: E & FN Spon. 1995. 244 p.

Neville, A. 1995. *Properties of concrete*. Essex. Longman Group. 844 p