



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **TERÄSBETONISTEN SILTAKANSIEN VEDENERISTEEN KUPLIMISONGELMA**

Ali Hoikkala

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Teräsbetonisten siltakansien vedeneristeen kuplimisongelma

Ali Hoikkala

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2022, 68 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Antti Niemi

Tässä diplomityössä tarkastellaan teräsbetonisten siltakansien vedeneristeen kuplimisongelmaa. Yleisen suomalaisen käsityksen mukaan kupliminen johtuu betonirakenteen suurista kosteuspitoisuuksista, betonin huokoisuudesta ja työvirheistä. Kuitenkaan kuplimisongelma ei ole ratkennut ja kupliminen aiheuttaa edelleen yhteiskunnalle liikenteellisiä haittoja ja ylimääräisiä korjauskustannuksia.

Diplomityön tavoitteena oli perehtyä siltakansien vedeneristeen kuplimisongelmaan sekä kotimaisten että kansainvälisten tutkimusten kautta, ja pyrkiä löytämään uusia näkökulmia ja havaintoja kuplimisongelman ymmärtämiseksi. Työn tavoitteena oli myös kartoittaa mahdollisia jatkotutkimustarpeita uusien näkökulmien ja havaintojen tueksi.

Työvirheet olivat edelleenkin suurin kuplimisen selittävä tekijä valtaosassa tutkimuksista. Uusien tutkimusten mukaan myös kuumuudella oli suuri myötävaikutus kuplien muodostumiseen siltakannelle. Kansainvälisten tutkimusten mukaan vesihöyrynpaineen lisäksi kuumuus aiheuttaa siltakannella kemiallisia reaktioita, jotka ovat nimetty kylmä- ja kuumaprosesseiksi. Myös osmoosin vaikutus kuplimiseen on tiedostettu kosteilla betonialustoilla.

Tutkimuksen perusteella kuplimista voitaisiin vähentää rajoittamalla muodostuvan kaasun painetta kermin alle. Eristysalustan kuivattaminen kosteusvaatimukseen on oleellinen asia tartuntalujuuksien kannalta. Ehyt tiivistyskäsittely tai laadukas suojabetonikerros estävät kuplan muodostumisen pintarakenteeseen. Työvirheiden välttäminen ja tarkat laadunmittaukset ovat loppujen lopuksi avain onnistumiseen.

*Asiasanat: sillat, teräsbetoni, vedeneristys, kupliminen*

# ABSTRACT

Problem with blistering of waterproofing of reinforced concrete bridge decks

Ali Hoikkala

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2022, 68 pp.

Supervisor at the university: Antti Niemi

This thesis examines the blistering problem of the waterproofing of reinforced concrete bridge decks. The common consensus within Finland, is that blistering is caused due to the high moisture content of the concrete structure, the porosity of the concrete and work defects. Despite the identification of these issues, blistering has not been solved and blistering continues to cause roadway inconveniences and incurs additional repair costs for the taxpayer.

The aim of this thesis was to become acquainted with the blistering problem that can occur during the bridge deck waterproofing process. Information was gathered using both domestic and international studies so as to discover new perspectives and to better understand the blistering problem and its causes. The aim of this work is also to map the possible needs for further research of this topic.

This research identified work defects as being the most prominent explanatory factor for blistering in the majority of studies. According to more recent studies, temperature contributed greatly to the formation of blisters on bridge decks. According to international studies, in addition to water vapor pressure, variances in temperature cause chemical reactions within the bridge deck, termed cold and hot processes. These chemical processes should be studied in greater detail in Finland, so as to gain a better understanding of this problem and to allow for the development of new methods and quality guidelines pertaining to materials and/or practices to limit the possibilities of chemical reactions.

According to this study, blistering could be reduced by limiting the pressure of the gas formed below the waterproofing. Ensuring that the insulation substrate is dry and meets

the moisture requirements is essential for adhesion strength during the waterproofing process. Proper sealing treatment or a protective concrete layer aids in the prevention of blister formation in the surface structure. Avoiding work defects and ensuring accurate measurements are crucial to the success of, as well.

*Keywords: bridges, reinforced concrete, waterproofing, blistering*

# ALKUSANAT

ELY-keskusten omistuksessa olevista silloista ilmoitettiin uusia kuplimishavaintoja vuoden 2021 aikana yhteensä 20:sta sillasta eripuolilla Suomea. Siltojen kupliminen aiheuttaa vuosittain kalliita korjauksia ja budjettien lisäkulut näkyvät muiden infrakohteiden korjausvelan kasvamisessa.

Tämä diplomityö on tehty Sitowise Oyn ja Väyläviraston ohjauksessa. Kiitokset Väyläviraston ohjaustiimille: Pekka Siitonen, Niina Onninen ja Timo Tirkkonen ja Sitowise Oyn Jani Valokoskelle. Kiitokset myös asiantuntijoille, jotka antoivat näkökulmia työn rakentumisen aikana: Janne Iho, Jommi Kuronen, Jarmo Julku ja Sami Vuorikoski.

Toivon mukaan diplomityö herättää keskustelua aiheen ympärillä ja keskusteluista syntyy hyviä ideoita, jotta pääsemme taas hieman lähemmäs kuplimisongelman estämistä.

Oulu, 10.5.2022

*Ali Hoikkala*

Ali Hoikkala

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	9
1.1 Tutkimuksen tausta .....	9
1.2 Tutkimuksen tavoite .....	11
1.3 Tutkimuksen rajaukset .....	11
1.4 Tutkimuskysymykset .....	11
2 Teräsbetonisen siltakannen rakenne .....	12
2.1 Siltakannen kuormat ja suunnitteluperusteet.....	12
2.1.1 Siltojen pysyvät kuormat .....	12
2.1.2 Siltojen liikennekuormat.....	12
2.1.3 Siltojen tuulikuormat .....	17
2.1.4 Siltojen lämpötilakuormat .....	18
2.1.5 Kuormien yhdistely .....	20
2.2 Siltakannen betonin vaatimukset.....	22
2.3 Siltakannen eristysalustan laatuvaatimukset .....	25
2.3.1 Eristysalueen puhtaus .....	26
2.3.2 Eristysalueen tasaisuus .....	27
2.3.3 Eristysalustan makrokarkeus .....	28
2.3.4 Eristysalueen kosteus .....	29
2.3.5 Tiivistys ja eristystöiden sääolosuhteet .....	31
2.4 Siltakannen esikäsittely .....	32
2.5 Siltakannen kermieristys .....	34
2.6 Siltakannen pintarakenteet .....	35
3 Sillan kannen kupliminen.....	39
3.1 Kuplimisen syntymekanismi .....	39
3.2 Lämpötilan vaikutus siltakannen kuplimiseen .....	43
3.2.1 Vesihöyryn paineen vaikutus.....	45
3.2.2 Orgaanisten komponenttien lämpöhajoaminen vedeneristyksessä.....	45
3.2.3 Kemialliset reaktiot betonipohjan epäorgaanisten yhdisteiden välillä .....	46
3.3 Osmoosin vaikutus kuplimiseen.....	48
3.3.1 Vedeneristeiden osmoottinen virtaus.....	49
3.3.2 Osmoosi epoksinnoitetussa betonirakenteessa .....	50
3.4 Epoksinnoitteisten teräsbetonisten siltakansien kupliminen .....	52
3.5 Työvirheet ja väärät toimintatavat.....	54
4 Tulosten tarkastelu .....	57

5 Johtopäätökset ja suositukset .....	60
6 Yhteenveto .....	63
LÄHDELUETTELO .....	65

# KÄSITTEET

Aluskermi on kaksikerroskermieristyksen alempi kermi.

Betonin absoluuttinen kosteus tarkoittaa betoninäytteen sisältämää, haihtuvaa kosteutta, mikä poistuu näytteestä, kun se kuivataan tuulettuvassa lämpökaapissa vakiopainoon 105 °C lämpötilassa.

Epoksiitiivistys on betonisen siltakannen kaksinkertainen epoksikäsitteily, jonka tehtävänä on tiivistää betonin pintaa eristyksen kuplimisen estämiseksi. Nykyään käytetään termiä ”tiivistysaine”, koska epoksi ei ole enää ainoa tiivistysaine siltakansien tiivistysaineena.

Eristysalusta tarkoittaa siltakannen eristettävää yläpintaa, reunapalkin eristettävää pintaa ja muita eristettäviä pintoja.

Kaksikerroskermieristys on kahdesta kermikerroksesta koostuva kermieristys.

Kannen pintarakenne on sillan kansirakenteen yläpuolella olevat vedeneristys-, suoja- ja päällystekerrokset.

Kastepiste on se lämpötila, jossa vesihöyryä sisältävän kaasun suhteellinen kosteus on 100 %.

Kermi on vedeneristystarkoituksiin käytettävä vettä läpäisemätön tuote, joka yksinään tai liitettynä toisiin samanlaisiin tai vastaaviin tuotteisiin muodostaa yhtenäisen vedeneristyskerroksen.

Kermieristys on yhtenäinen kermeistä eristysalueelle tehtävä vedeneristysrakenne.

Kumibitumi on massa, joka saadaan lisäämällä bitumiin termoplastisia elastomeereja, jotta bitumin venyvyys ja taivutettavuus alhaisissa lämpötiloissa oleellisesti paranevat.

Kumibitumikermi on tukikerroksellinen vedeneristyskermi, jossa eristävänä aineena on kumibitumi.

Pintakermi on kaksikerroskermieristyksen ylempi kermi.

SILKO tarkoittaa siltojen korjausohjeita.

Sillan päällyste on kannen pintarakenteen päällimmäinen osa, joka koostuu yleensä sidekerroksesta ja kulutuskerroksesta.

Tartuntalujuus on pinta-alayksikköä kohti tarvittava voima, joka tarvitaan irrottamaan eristysmateriaali alustastaan.

Tiivistysainekäsittely on siltakannen kaksinkertainen tiivistyskäsittely



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Teräsbetonisiltojen kansirakenteeseen asennetaan vedeneritys pitämään hulevesi ja mahdolliset tiesuolat pois kantavasta teräsbetonirakenteesta. Betonisten siltakansien yleisimmät vedeneristysvaihtoehdot ovat kaksinkertainen kumibitumikermieristys, nestemäisenä levitettävä vedeneristys ja kumibitumimastiksieristys. (RIL 179-2018, s.355-356) Perehdyn tässä diplomityössä kumibitumikermieristyksen haitalliseen kuplimisongelmaan.

Yleisimmissä pintarakenneratkaisuissa kumibitumikermieriste ja pintarakenteet ovat tiukasti kiinni kansirakenteessa, jolloin kestävyys kulutukselle on optimaalinen (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.32). Kuitenkin osassa kaksinkertaisen kumibitumikermieristeen silloista pintarakenteet alkavat kuplia, eli sillankannen asfaltti nousee koholle. Kuplan kohdalta asfaltti rapautuu ja vedeneristys kuluu rikki menettäen päätarkoituksensa ja teräsbetonikansi altistuu haitallisille rasituksille. Kuplan muodostuessa pintarakenteeseen, korjaustoimina on yleensä joko yksittäisien vaurioiden paikallinen korjaaminen tai laajimmillaan koko siltakannen pintarakenteiden uusiminen.

Suomalaisen tutkimuskäsityksen mukaan lämpötilakuorma ja kosteus ovat suurimpia selittäviä tekijöitä kuplien muodostumisessa. Lämpötilan kasvaessa kesähelteillä kosteus höyrystyy sillankannen betonirakenteessa ja aiheuttaa vesihöyrynpainetta vedeneristyskermin alle. Liiallisen kosteuden myötä myös tiivistysaineen tartuntalujuus jää riittämättömäksi ja alttiut kuplan muodostumiselle kasvaa. (Laukkanen ym. 1998, s.85-86)

Kuplimisongelman syynä on arveltu olevan myös huokostettuun betoniin siirtyminen. Tavoiteltu ominaisuus huokostetulla betonilla on parempi pakkasenkestävyys, jolloin sitoutumaton vesi pääsee laajentumaan ilmahuokosiin ja betoni välttyy pakkasrapautumiselta. Teorian mukaan ilmahuokokset jakaantuvat betonivalussa epätasaisesti sillan kanteen valun riittämättömän tiivistyksen vuoksi. Ilmakuplien noustessa valussa sillankannen yläpintaan, jää eristysalusta liian karkeaksi. Tiivistysaineen menekki kasvaa eristysalustan liiallisen karkeuden vuoksi ja höyrytie veys

on hankala saavuttaa. Myös kumibitumikermien riittävän tartuntalujuuden saaminen liian karkeaan eristysalustaan on haastavaa. (Laukkanen ym. 1998, s.91)

Kuplimisongelmaa lisäävät ilmasto-olosuhteiden rasitukset. Suuret lämpötilavaihtelut aiheuttavat liikkeitä siltojen kansilaatoissa, mistä aiheutuu liikkeitä vedeneristykseen. Myös talviliukkauden torjunnassa käytetty suolaus aiheuttaa rasitusta kermeihin. (RIL 179-2018, s.354) Kuplimisen syyt eivät ole yksiselitteisiä. Usein syiden arvellaan olevan työmaalla tapahtuvista virheistä tai huolimattomuuksista johtuvia, mutta työmaalta tulleen palautteen mukaan kuplimista tapahtuu, vaikka työt ovat tehty kaikkien ohjekirjojen mukaisesti (Siitonen 2021).

Pintarakenteiden ongelmallisen kuplimisen alkaminen on osoitettu alkavaksi 1990-luvulla, jolloin kermieristyksen päältä jätettiin pois 50 mm paksu suojabetoni. Suojabetoni on suojannut sillan kannen kuumenemista ja vähentänyt sitä kautta vesihöyryn muodostumista bitumikermin ja sillan kannen väliin. Suojabetoni on samalla luonut lisäkuorman (eli vastapaineen) kermieristeen päälle, jolloin kuplimiseen vaadittaisiin suurempi vesihöyryn paine kuplan muodostumiseksi. Ongelman tiedostamisen myötä on suojabetoni tullut takaisin pintakerroksien vaihtoehtoihin. (Laukkanen ym. 1998, s.3; RIL 179-2018, s.354)

Siltakansi on myös useissa kohteissa pyritty tiivistämään tiivistysaineella. Tiivistyskäsittelyä on pidetty vaihtoehtoisena toimintatapana suojabetonin ohella kuplimisen estämisessä. Tiivistyskäsittelyn myötä vesihöyry ei pääse vedeneristyksen alapuolelle muodostamaan kuplaa. (Laukkanen ym. 1998, s.85)

Kuplimisongelma ei ole täysin ratkennut, vaan kuplimista tapahtuu edelleenkin. Takuuajana tapahtuvat kuplimiset, jotka voidaan todeta pintakerroksen avauksessa rakennusvirheen vuoksi syntyväksi, tulevat urakoitsijan kustannettavaksi. Epäselvissä tapauksissa ja takuuajan jälkeen ilmaantuvissa kuplimisissa maksajaksi joutuu yleensä sillan omistaja. Kupliminen aiheuttaa rahallisia kuluja ja liikenteellisiä haittoja yhteiskunnalle. (Siitonen 2021)

## 1.2 Tutkimuksen tavoite

Diplomityön tavoitteena on perehtyä siltakansien vedeneristeen kuplimisongelmaan kotimaisten ja kansainvälisten tutkimusten kautta sekä pyrkiä löytämään uusia näkökulmia ja havaintoja kuplimisongelman ymmärtämiseksi. Työn tavoitteena on myös kartoittaa mahdollisia jatkotutkimustarpeita löydettyjen näkökulmien ja havaintojen tueksi.

## 1.3 Tutkimuksen rajaukset

Diplomityössä käsitellään ensisijaisesti kumibitumikermieristeiden kuplimisongelmaa teräsbetonirakenteisissa siltakansissa. Työstä on rajattu pois tukikerrokselliset sillat, mukaan lukien rautatiesillat, koska niiden kuplimisongelman havaitseminen on haastavampaa tukikerroksen myötäilevyyden vuoksi.

Kuplimista on havaittu tapahtuvan myös puukantisissa silloissa ja nestemäisenä levitettävien vedeneristeiden yhteydessä sekä suojabetonin ja asfaltin välissä. Nämä tekijät ovat rajattu tutkimuksesta pois.

## 1.4 Tutkimuskysymykset

Tutkimukseni vastaa kysymyksiin:

- Mitkä tekijät lisäävät kuplimista kansainvälisten tutkimusten mukaan?
- Onko löydetty uusia keinoja vähentää kuplimista, jotta sillan kannen pintarakenne ei kärsisi vahinkoa.
- Mitä tutkimuksia tulisi vielä tehdä kuplimisongelman selvittämiseksi?

## 2 TERÄSBETONISEN SILTAKANNEN RAKENNE

### 2.1 Siltakannen kuormat ja suunnitteluperusteet

Kantavien rakenteiden suunnittelussa on käytetty eurokoodien mukaisia laskentatapoja 1.6.2010 lähtien. Eurokoodeista on tuotettu Liikenneviraston toimesta (nykyisin Väylävirasto) soveltamisohjeet ja menetelmät siltarakenteiden suunnittelijoille, jotta eurokoodien ja Liikenneviraston edellyttämät vaatimustasot täytyisivät. Soveltamisohjeet kulkevat nimellä NCCI-sarja, joihin kuuluu NCCI 1, NCCI 2, NCCI 4, NCCI 5 ja NCCI 7. Teräsbetonisten siltakansien suunnittelussa käytetään NCCI 1:stä ja NCCI 2:sta. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.5)

Soveltamisohjeet ovat tarkoituksenmukaisesti yksinkertaistettuja eivätkä ota huomioon kaikkia eurokoodin esittämiä asioita, joten ohjeita tulee käyttää rinnakkain eurokoodien standardien sekä niiden siltoja koskevien kansallisten liitteiden kanssa. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.5)

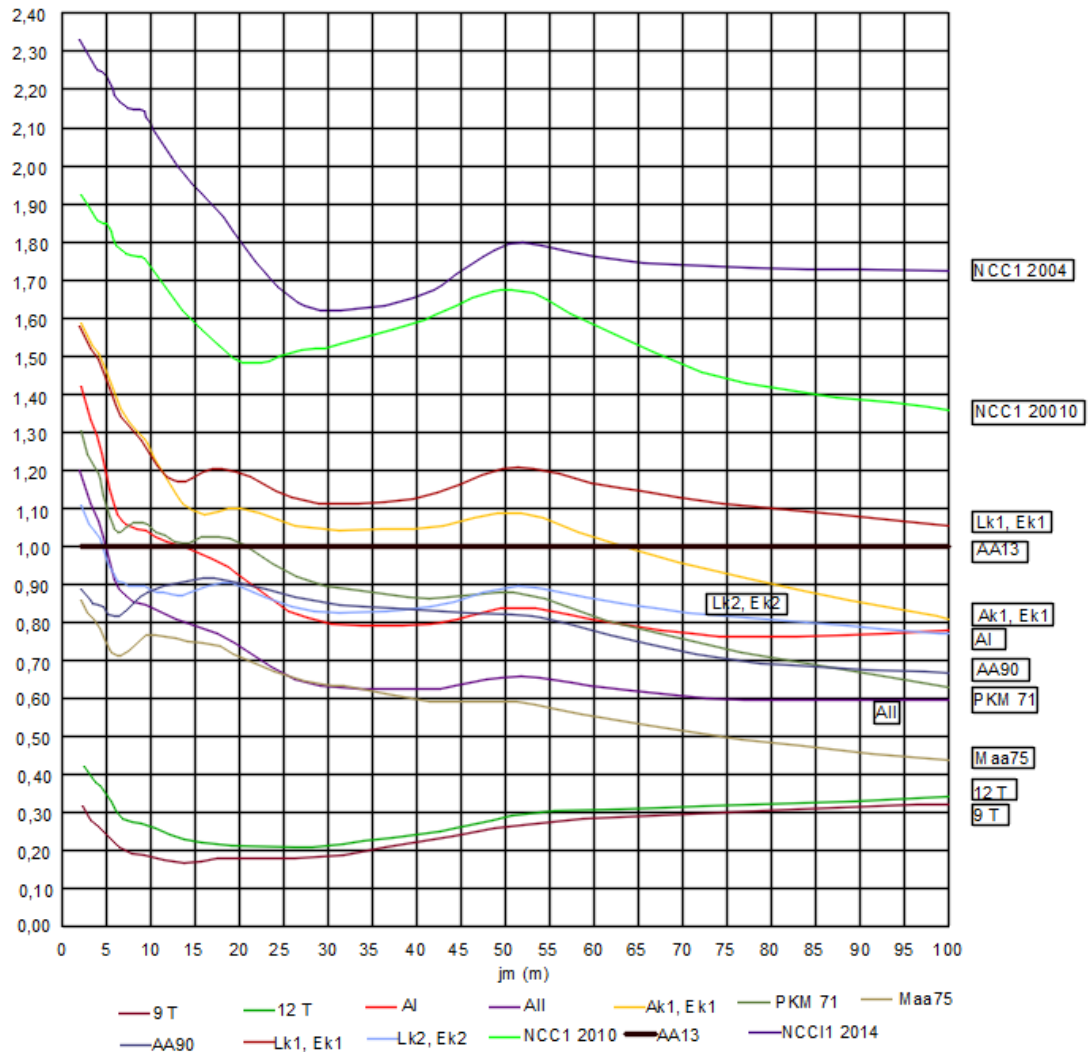
#### 2.1.1 Siltojen pysyvät kuormat

Standardissa SFS-EN 1991-1-1 liitteen A-aulukossa on määritelty rakennusmateriaalien ja varastoitavien tuotteiden laskennassa käytettävät tilavuuspainot. Rakennusmateriaalit ja tuotteet muodostavat rakenteiden pysyvät kuormat. NCCI 1:n lisämääritelmän mukaan siltojen rakenteissa tulisi käyttää tilavuuspainojen yläraja-arvoja. Raudoitettun betonin tilavuuspainona kantavuuslaskennassa käytetään  $25 \text{ kN/m}^3$  ja rakenneteräkselle  $78,5 \text{ kN/m}^3$ . Pintarakenteiden tilavuuspainoja laskettaessa valuasfaltille ja asfalttibetonille käytetään arvoa  $25 \text{ kN/m}^3$  ja hiekalle sekä soralle  $16 \text{ kN/m}^3$ . Päällysteen painoa laskettaessa tulee varautua  $1 \text{ kN/m}^2$  lisäpäällystekerrokseen. Tukikerroksen painona käytetään vähintään 600 mm tukikerroksen paksuutta ja varaudutaan 200 mm lisätukikerrokseen. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.8-9)

#### 2.1.2 Siltojen liikennekuormat

Siltojen nykyiset tieliikennekuormat tulevat standardin SFS-EN 1991-2 vaatimuksista ja ovat esitetty ohjeessa NCCI 1. Liikennekuormien ajoneuvokuormat määritellään kuormakaavioiden LM1...LM4 mukaan. Rakenteiden jokainen osa mitoitetaan sille

kaaviole, joka antaa määrävän vaikutuksen. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.10) Alkuperäistä vuonna 2010 käyttöön otettua LM1 kuormaa on päivitetty vuonna 2014 kattamaan uuden ajoneuvoasetuksen AA13 vaatimukset. Vuosien 2010 ja 2014 LM1:n erot korostuvat erityisesti pitkillä jännemitoilla (>50 m) johtuen kasvatetuista pintakuormista. (RIL 179-2018, s.151, 298)



Kuva 1. Murtorajatilan suunnittelukuormien suhde (aukkomomentit) ajoneuvoasetuksen (AA13) sallittuun murtorajatilan kuormaan (mukaiilen RIL 179-2018, s.152).

Suomen tämänhetkistä maantiesilloista (tilasto 1.1.2016) suurin osa on rakennettu tasoltaan riittäväälle kuormitukselle, kuten kuvasta 1 voidaan lukea NCCI 1:n ja Lk1, Ek1 -suunnittelukuormien olevan ajoneuvoasetuksen AA13 (mustaviiva) yläpuolella.

Kyseisen tilaston mukaan NCCI 1:stä edeltävällä suunnittelukuormalla Lk1, Ek1 on mitoitettu 58 % Suomen käytössä olevista silloista ja NCCI 1 suunnittelukuormilla 2 %. (RIL 179/2018, s.151-151)

Eurokoodien soveltamisohje NCCI 1 määrittää kuormakaavioiden LM1...LM4 kuormittavan sillan pituussuuntaista pintaa 3 metrin levyisinä kuormakaistoina. Kuormakaistat sijoitellaan sillan poikkisuunnassa siten, että saavutetaan määräävä vaikutus. Kuormakaavio LM1 koostuu kuormakaistoille sijoitettavista tasaisesti jakautuneista kuormista (UDL) ja kahden akselikuorman muodostamista telikuormista taulukon 1 arvojen mukaisesti. Telikuormien akseliväli on 1,2 m ja akseli koostuu kahdesta 2 metrin etäisyydellä toisistaan sijaitsevasta pyöräkuormasta. Pyöräkuormien kosketuspintana on 0,4 x 0,4 m<sup>2</sup> alue. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.10-11)

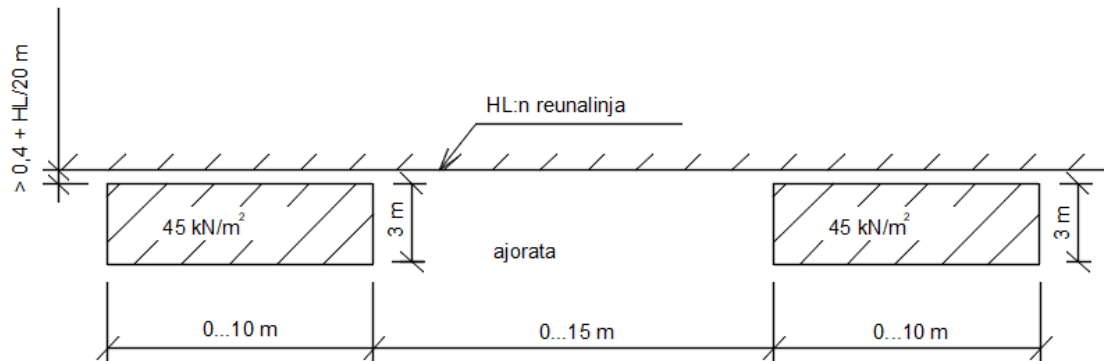
*Taulukko 1. Kuormakaavion LM1 kuormien ominaisarvot (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.11).*

Sijainti	Yleiset tied			
	Telikuorma		UDL	
	$\alpha_{qi}$	$2 \times \alpha_{qi} \times Q_{ik}$ (kN)	$\alpha_{qi}$	$\alpha_{qi} \times Q_{ik}/q_{ik}$ (kN/m <sup>2</sup> )
Kaista nro 1	1,0	2x300	1,0	9
Kaista nro 2	1,5	2x300	2,4	6
Kaista nro 3	0	-	1,2	3
Muut kaistat	-	-	1,2	3
Kaistojen ulkopuolinen alue ( $q_{ik}$ )	-	-	1,2	3

Kuormakaavion LM2 kuormakaistoille sijoittuva akselikuorma on  $\beta_Q \cdot Q_{ak} = 1,0 \cdot 400$  kN, ja sen kosketuspintana on 0,35 x 0,6 m<sup>2</sup> alue. Kuormakaavion leveys on 3 metriä. Liikuntasuomalaitteiden vieressä käytetään lisäksi dynaamista lisäsuurennuskerrointa SFS-EN 1991-2 kohdan 4.61 mukaisesti. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.11)

Kuormakaavio LM3 mitoitaa rakenteet murtorajatilassa ja käyttörajatilassa sekä tarkistaa alusrakenteiden kantavuuden. LM3 koostuu kahdesta 10 metrin pituisesta 45 kN/m<sup>2</sup> jakaantuneesta kuormasta koko 3 metriä leveän kaistan leveydelle, jotka kulkevat 15

metrin päässä toisistaan kuvan 2 mukaisesti. Kuormitus sijaitsee vain yhdellä kaistalla. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.11-12)



Kuva 2. Kuormakaavio LM3 (mukaiillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.12).

Kuormakaavio LM4 on tungoskuorma ja se voidaan ottaa laskelmissa huomioon hankekohtaisesti. Kuormakaaviossa kuormitus on tasan jakaantunut 5 kN/m<sup>2</sup> kuorma, joka jaetaan sillan hyötyleveydelle siten, että siitä syntyy määräävä vaikutus. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.12)

Vaakasuuntaiset kuormitukset syntyvät jarrutus- ja kiihdytyskuormista. Kuorma voidaan otaksua jakaantuvat tasaisesti pituussuunnassa koko ajoradan leveydelle. Jarrukuorma saadaan NCCI 1:ssä annetuilla kaavoilla. Suomessa jarrukuorman ylärajana käytetään 500 kN. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.12)

Keskipakokuormat ja sivukuormat määräytyvät ajoradan keskiviivan vaakasäteen avulla taulukon 2 mukaisesti. Suomen kansallisilla valinnoilla  $Q_v$  arvoksi on määritetty 600 kN mikäli siltakannelle mahtuu vain yksi kaista ja 1200 kN kaistoja ollessa enemmän kuin yksi. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.13)

Taulukko 2. Keskipakovoiman ominaisarvo (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.13).

$Q_*$ [kN]	r [m]
$0,2 Q_v$	200
$40 \cdot Q_v / r$	200...1500
0	1500

Vinosta jarrutuksesta aiheutuvan poikittaisen kuorman  $Q_{trk}$  lasketaan olevan 25 % pituussuuntaisesta jarru- tai kiihdytyskuormasta. Vaino jarrutuskuorma oletetaan vaikuttavan samanaikaisesti jarru- ja kiihdytyskuorman kanssa. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.13)

Kuormaryhmät muodostetaan liikennekuormista taulukon 3 mukaisesti yhdisteltynä. Kuormaryhmät gr1a, gr1b, gr2, gr3, gr4 ja gr5 käsitellään yksittäisinä kuormina, eivätkä ne esiinny samanaikaisesti kuormitusyhdistelyissä. Jokaisella kuormaryhmällä on oma käyttötarkoituksensa kuormitusyhdistelyissä. Taulukossa esiintyvät yhdistelykertoimet ovat Suomen kansallisia valintoja. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.13)

Taulukko 3. Tieliikenteen siltojen kuormaryhmät (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.13).

AJORA TA PIENTAREINEEN								Kevyen liikenteen väylä
Pystykuormat					Vaakakuormat		Vain Pystykuorma (EN 1991-2_5.3.2.1)	
LM1 Teli UDL (EN 1991-2_4.3.2)		LM2 Yksittäinen akseli (EN 1991-2_4.3.3)	LM3 Erikoiskuorma (EN 1991-2_4.3.4)	LM4 Ruuhkakuormitus (EN 1991-2_4.3.5)	Jarru- ja kiihdytyskuormat (EN 1991-2_4.4.1)	Keskipakokuorma ja sivukuorma (EN 1991-2_4.4.2)		
gr1a	Ominaisarvo 1	1						Yhdistelyarvo 3 kN/m <sup>2</sup>
gr1b		Ominaisarvo 1						
gr2	Tavallinen arvo ( $\psi_1$ ) 0,75	0,4			Ominaisarvo 1	Ominaisarvo 1		
gr3							Ominaisarvo 5 kN/m <sup>2</sup>	
gr4				Ominaisarvo 1			Ominaisarvo 5 kN/m <sup>2</sup>	
gr5			Ominaisarvo 1					



### 2.1.3 Siltojen tuulikuormat

Standardin SFS-EN 1991-1-4 ja kansallisen liitteen vaatimukset siltojen suunnitteluun ovat voimassa. Taulukossa 4 on esitetty tuulenpaineen arvoja, jotka ovat laskettu standardissa esitetyllä 23 m/s tuulennopeudella. Esitettyjä tuulenpaineen arvoja voidaan käyttää pienten ja keskisuurten tavanomaisten siltojen suunnittelussa. Suurten ja tavanomaisesta poikkeavien siltakohteiden kohdalla tulee tehdä tarkempi tuulianalyysi. Hankekohtaisesti voidaan vaatia erillinen dynaaminen analyysi. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.40)

*Taulukko 4. Siltaan kohdistuva tuulenpaine (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.40).*

Maasto- luokka	0		I		II		III		IV	
	$z_e \leq 20$ m	$z_e = 50$ m	$z_e \leq 20$ m	$z_e = 50$ m	$z_e \leq 20$ m	$z_e = 50$ m	$z_e \leq 20$ m	$z_e = 50$ m	$z_e \leq 20$ m	$z_e = 50$ m
$\leq 0,5$	3,58	4,18	2,54	3,02	<b>2,23</b>	<b>2,75</b>	1,73	2,28	1,30	1,86
$\geq 4^a$	1,94	2,26	1,37	1,64	<b>1,21</b>	<b>1,49</b>	0,94	1,24	0,71	1,01
$\geq 5^b$	1,49	1,74	1,06	1,26	<b>0,93</b>	<b>1,15</b>	0,72	0,95	0,54	0,77

<sup>a</sup> Koskee siltaa, jossa kaiteet ovat avoimet, ts. kaiteen projektiopinta-alasta yli 50 % on avointa.

<sup>b</sup> Koskee siltaa, jossa on yhtä aikaa esiintyvä liikennekuorma tai kaiteet ovat suljetut (kysymyksessä on umpikaide tai kaide, jonka projektiopinta-alasta vähemmän kuin 50 % on avointa).

Taulukossa 4 b tarkoittaa siltakannen leveyttä,  $d_{tot}$  tarkoittaa siltakannen korkeutta ja  $z_e$  tarkoittaa siltakannen painopisteen etäisyyttä maan pinnasta. Tieliikenteen korkeudeksi oletetaan 2 metriä, joka lasketaan mukaan  $d_{tot}$ -arvoon. Mikäli tuulikuorma on merkittävä sillan pilareihin, tulee kuorma ottaa huomioon standardin SFS-EN 1991-1-4 (kohdan 8.4) ja siihen liittyvän kansallisen liitteen mukaan. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.40-41)

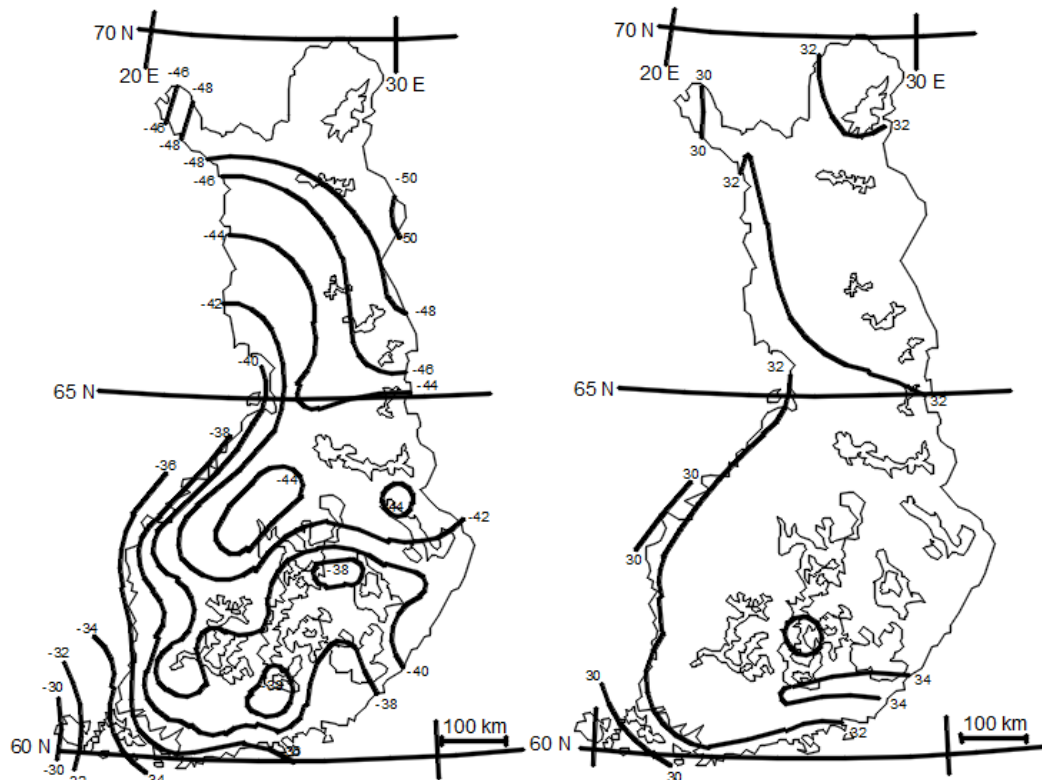
Sillan pituussuuntaisina tuulikuormina käytetään 25 % poikittaisista tuulikuormista palkki- ja laattasilloilla ja 50 % ristikkosilloilla. Pystysuuntaiset tuulikuormat määritellään SFS-EN 1991-1-4 (kohdan 8.3.3) mukaan. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.41)

### 2.1.4 Siltojen lämpötilakuormat

Lämpötilakuormat määritellään standardin SFS-EN 1991-1-5 mukaan. NCCII jakaa siltojen päällysrakenteen kolmeen ryhmään, jotka ovat:

- Tyyppi 1: Teräspäällysrakenne
- Tyyppi 2: Liittopäällysrakenne
- Tyyppi 3: Betonipäällysrakenne (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.42)

Betonipäällysrakenteisten siltojen maksimilämpötilana pidetään 2 °C lämpimämpää lämpötilaa kuin varjossa mitattu ilman lämpötila. Vastaavasti siltojen minimilämpötilat ovat betonisilloilla 8 °C ylemmät kuin ilman minimilämpötilat. Lämpötilan ääriarvot Suomessa on esitetty kuvassa 3. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.42)



Kuva 3. Lämpötilan ääriarvot Suomessa (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.43).

Sillan alkulämpötilana  $T_0$  käytetään arvioitua valulämpötilaa, jos se on ennakoitavissa. Muutoin voidaan käyttää standardin SFS-EN 1991-1-5 (liitteen A) suositusarvoa 10 °C. Sitoutumislämpötila (verrattuna alkulämpötilaan  $T_0$ ) voi aiheuttaa rakenteeseen

merkittäviä siirtymiä tai jännityksiä, jotka tulee ottaa huomioon yleisesti hyväksytyillä menetelmillä. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.43)

Betonirakenteisille silloille riittää yleensä pystysuuntainen lämpötilaerotarkastelu, joka tehdään lineaarisella lämpötilaeromenetelmällä. Kuitenkin kotelomalliset betonikannet tulee tarkastella epälineaarisesti tai vaihtoehtoisesti lineaarisen tarkastelun lisäksi hyppäykselliselle lämpötilaerolle eri rakenneosien välillä. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.43)

Taulukossa 5 on esitetty lämpötilaerot 50 mm päällystepaksuiselle rakenteelle. Lämpötilaeroja korjataan taulukon 6 mukaisilla korjauskertoimilla päällysrakenteen päällystepaksuuksien mukaan. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.44)

*Taulukko 5. Lineaariset pystysuuntaiset lämpötilaerot (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.44).*

Päällysrakennetyyppi:	Yläpinta lämpimämpi $\Delta T_{M,heat}$ (°C)	Alapinta lämpimämpi $\Delta T_{M,cool}$ (°C)
Tyyppi 1: Teräspäällysrakenne	18	13
Tyyppi 2: Liittopäällysrakenne	15	18
Tyyppi 3: Betonipäällysrakenne		
betonikotelo	10	5
betonipalkki	15	8
betonilaatta	15	8

Eri rakenneosien välille syntyvän lämpötilaeron vaikutukset otetaan huomioon lämpötilan muutoksesta aiheutuviin vaikutuksiin. Betonisilloilla kannen ja palkkien tai kotelon välillä lämpötilaerona käytetään  $+5$  °C. Kuitenkaan taulukon 6 mukaisia yksittäisen rakenneosan maksimi- tai minimilämpötilaja ei tule ylittää. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.44)

Taulukko 6. Lämpötilaeron korjauskerroin (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.44).

Tiesillat, kevyen liikenteen sillat ja rautatiesillat: korjauskerroin $k_{sur}$						
Päällysteen paksuus [mm]:	Tyyppi 1		Tyyppi 2		Tyyppi 3	
	$\Delta T_{M,heat}$ (°C)	$\Delta T_{M,cool}$ (°C)	$\Delta T_{M,heat}$ (°C)	$\Delta T_{M,cool}$ (°C)	$\Delta T_{M,heat}$ (°C)	$\Delta T_{M,cool}$ (°C)
päällystämätön:	0,7	0,9	0,9	1,0	0,8	1,1
vesieristetty:	1,6	0,6	1,1	0,9	1,5	1,0
50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	0,7	1,2	1,0	1,0	0,7	1,0
150	0,7	1,2	1,0	1,0	0,5	1,0
750 (tukikerros)	0,6	1,4	0,8	1,2	0,6	1,0

Lämpötilan muutos ja lämpötilaero yhdistellään standardin SFS-EN 1991-1-5 (kaavojen 6.3 ja 6.4) mukaan. Yhdistelystä saadaan laskettu lämpötilakuormien vaikutus ( $T_k$ ), jota käytetään kuormitusyhdistelyissä lämpötilan mitoitusarvona. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.44)

### 2.1.5 Kuormien yhdistely

Kuormien yhdistely määritellään standardin SFS-EN 1990 muutoksen A1 (SFS-EN 1990:2002/A1 - liite A2) sekä sen kansallisten liitteiden vaatimusten mukaan. Standardin SFS-EN 1990 liitteessä A2 esitetään siltojen suunnitteluun käytettäviä, kuormien yhdistelyä koskevia sääntöjä ja menetelmiä käyttörajatila- ja murtorajatilata tarkasteluihin. Liitteessä annetaan myös eri kuormien osavarmuuslukujen ja yhdistelykertoimien suositeltavia mitoitusarvoja. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.54)

Kuormien yhdistelyssä kuormia, jotka eivät fyysikaalisista tai toiminnallisista syistä esiinny samanaikaisesti, ei tarvitse ottaa huomioon samanaikaisessa yhdistelyssä. Murtoraja- ja käyttörajatilan kuormitusyhdistelyt muodostetaan standardin SFS-EN 1990 liitteessä A2 taulukkojen A2.4...A2.6 mukaisesti ja taulukoissa esiintyvät yhdistelykertoimien arvot saadaan standardin taulukoista A2.1...A2.3. Taulukossa 7, 8 ja 9 on esitetty kuormitusyhdistelmätaulukkojen merkinnät ja kaikki mahdolliset tiesiltojen kuormitusyhdistelmät murto- ja käyttörajatiloissa. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.54)

Taulukko 7. Kuormitusyhdistelytaulukkojen merkinnät (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, liite 1A/1(3)).

TAULUKKOJEN MERKINNÄT	
gr1...gr5	Kuormaryhmät (kpl B.4.5)
F <sub>wk</sub>	Tuulikuorma (kpl C)
T <sub>k</sub>	Lämpötilakuorma (kpl D)
BF	Laakerikitka (kpl H.3)
IL	Jääkuorma (kpl H.1)
S	Tukipainuma (kpl H.2)
TLEP	Liikennekuorman maanpaine (kpl H.4)
1...	Kuormitusyhdistelyn numero (murtorajatila)
1a...	Kuormitusyhdistelmän juokseva numero ('a'=käyttörajatilan ominaisyhdistelmä)
1b...	Kuormitusyhdistelmän juokseva numero ('b'=käyttörajatilan tavallinen yhdistelmä)
1c	Kuormitusyhdistelmän numero ('c'=käyttörajatilan pitkäaikaisyhdistelmä)

Taulukko 8. Tiesiltojen murtorajatilan kuormitusyhdistely (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, liite 1A/2(3)).

TIESILLAT - MURTORAJATILA														
KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVA KUORMA (6.10b)														
YHDISTELYKAAVAT MRT 1 - MRT 11														
		MRT 0	MRT 1	MRT 2	MRT 3	MRT 4	MRT 5	MRT 6	MRT 7	MRT 8	MRT 9	MRT 10	MRT 11	
		6.10a	gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	F <sub>wk</sub>	T <sub>k</sub>	BF	IL	TLEP	
SET A (EQU) & SET B (STR/GEO)	Ompaino	1,35	LM1	LM2	LM1+vaaka	kevyt	ruuhka	LM3	Tuuli	Lämpötila	Laakerikitka	Jääkuorma	Lk-maap.	
	Esiännitys	1,1 / 0,9 <sup>4)</sup>	STR/GEO: 1,25 / 0,9 STR/GEO: 1,1 / 0,9 <sup>4)</sup>						EQU: 1,15 / 0,9 EQU: 1,1 / 0,9 <sup>3)</sup>					
SET A (EQU) & SET B (STR/GEO)	Teilt	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	
	UDL	-	1,35	-	-	-	-	-	-	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	
	Kevyt	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	1,35 x 0,4	
	gr1b (LM2)	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	gr2 (LM1+vaaka)	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	
	gr3 (Kevyt)	-	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	-	
	gr4 (Ruuhka)	-	-	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	-	
	gr5 (LM3)	-	-	-	-	-	-	1,35	-	-	-	-	-	
	F <sub>wk</sub> <sup>1)</sup>	-	1,5 x 0,6	-	-	-	-	-	-	1,5	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	T <sub>k</sub> <sup>2)</sup>	-	1,5 x 0,6	-	-	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	-	1,5 x 0,6	1,5	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	BF	-	1,5 x 0,6	-	-	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	-	1,5 x 0,6	1,5	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6	1,5 x 0,6
	IL	-	1,5 x 0,7	-	-	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	-	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7	1,5 x 0,7
	S <sub>2)</sub>	-	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	TLEP	-	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35 x 0,75	1,35

1) Tuulikuormasta huomio: Tuulikuorma lasketaan erikseen tyhjän sillan tapaukselle, jossa se esiintyy yhtä aikaa liikennekuorman kanssa.

2) Lämpötilakuorma/tukipainuma voidaan jättää pois murtorajatilayhdistelystä mikäli rakenteella on riittävästi muodonmuutokykyä (ks. materiaalkohtaiset sovellusohjeet)

3) Stabiilitettä tarkasteltaessa (EQU) 1,30 / 0,9 (EN 1992-1-1: 2.4.2.2)

4) Paikalliset vaikutukset 1,20 / 0,9 (STR/GEO) (EN 1992-1-1: 2.4.2.2)

- Passiivipaineen yhdistely kerroin alhaaltavan kuorman mukaan ja varmuusluku pysyvän kuorman mukaan

- Vedenpinnan aseman vaikutukset yhdistellään pysyvän kuorman kanssa siten että saavutetaan määräävä yhdistely

= Määräävä muuttuva kuorma

Murtorajatilan kuormitusyhdistelyllä tarkastetaan siltojen staattinen tasapaino ja rakenneosien kestävyys. Anturoiden ja paalujen suunnittelu ja luiskien vakavuustarkastelut tehdään myös murtorajatilan mukaan. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.56)

Taulukko 9. Tiesiltojen käyttörajatilan kuormitusyhdistely (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 24/2017, liite 1A/3(3)).

TIESILLAT - KÄYTTÖRAJATILA - Ominaisyhdistelmä (6.14), Tavallinen yhdistelmä (6.15), Pysyvät kuormat (6.16)														Pysyvät														
KUORMITUSYHDISTELYN MÄÄRÄÄVÄ MUUTTUVA KUORMA														KRT 1c		KRT 1d												
KRT 1a - KRT 11a											KRT 1b - KRT 11b																	
1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a	9a	10a	11a	1b	2b	5b	7b	8b	9b	10b	11b	1c	1d								
gr1a	gr1b	gr2	gr3	gr4	gr5	F <sub>wk</sub>	T <sub>k</sub>	BF	IL	TLEP	gr1a	gr1b	gr4	F <sub>wk</sub>	T <sub>k</sub>	BF	IL	TLEP										
1														1														
Omapaino	1														1													
Esijännitys	1														1													
gr1a	Telit	-	-	-	-	-	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	-							
	UDL	1	-	-	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-	-	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-							
	Kevyt	-	-	-	-	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
gr1b	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
gr2	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-							
gr3	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-							
gr4	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	-							
gr5	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-							
F <sub>wk</sub> <sup>1)</sup>	0,6	-	-	-	-	-	1	0,6	0,6	0,6	0,6	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-	-							
T <sub>k</sub>	0,6	-	0,6	0,6	0,6	-	0,6	1	0,6	0,6	0,6	0,5	-	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5							
BF	0,6	-	0,6	0,6	0,6	-	0,6	0,6	1	0,6	0,6	0,4	-	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4							
IL	0,7	-	0,7	0,7	0,7	-	0,7	0,7	1	0,7	0,7	0,2	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2							
S <sup>2)</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
TLEP	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	-	0,75	0,75	0,75	0,75	1	-	-	-	-	-	-	-	0,75*	-	-							

1) Tuulikuormasta huomio: Tuulikuorma lasketaan erikseen tyhjän sillan tapaukselle, jossa se esiintyy yhtä aikaa liikennekuorman kanssa.

2) Tuikipainuma ja vedenpinnan asema yhdistetään pysyvän kuorman kanssa siten että saavutetaan määräävä yhdistely

3) Onnettomuusyhdistelmässä liikennekuormakaavio LM1 otetaan huomioon (tavallisella arvolla) vain yhdellä kaistalla.

4) Liikenteen aiheuttaman vaakasuuntaisen maanpaineen tapauksessa voidaan käyttää arvoa 0,4

- Passiivipaineen yhdistelykerroin alhauttavan kuorman mukaan

□ = Määräävä muuttuva kuorma

Tiesillat		
Onnettomuusyhdistelmä		
Ad	1	1
Omapaino	1	1
Esijännitys	1	1
gr1a	Telit	0,75
	UDL	0,4
	Kevyt	-
gr1b	-	0,75
gr2	-	-
gr3	-	-
gr4	-	-
gr5	-	-
F <sub>wk</sub>	-	-
T <sub>k</sub>	0,5	-
BF	0,4	-
IL	0,2	-
S <sup>2)</sup>	-	-
TLEP	-	-

Käyttörajatilojen ominaisyhdistelyllä tarkastetaan palautumattomia muodonmuutoksia, kuten esimerkiksi betonirakenteen jännitysrajat ja laakereiden sekä liikuntasauvojen liikevarat. Käyttörajatilan tavallisella yhdistelyllä tarkastellaan palautuvia muodonmuutoksia, kuten siltojen taipumarajatilat ja lyhytaikaisen tilanteen halkeamarajatila. Pitkäaikaisella yhdistelmällä tarkastetaan betonin jännitysrajatila, jännitetyn rakenteen jänteitä ympäröivän betonin pysyminen puristettuna ja pitkäaikaisen tilanteen halkeamarajatila. Pysyvien kuormien yhdistelyllä tarkastetaan esimerkiksi jännitetyn rakenteen vetojännityksetön tila kaikilla pinnoilla ja laakerikitkan aiheuttama kuorma. (Liikenneviraston ohjeita 24/2017, s.60-61)

## 2.2 Siltakannen betonin vaatimukset

Suomessa Väyläviraston siltakansiin käytetään infrabetonia, jonka valmistus-, ennakkokoe- ja suhteitusvaatimukset ovat esitetty ohjeessa Infrabetonien valmistusohje

(Väyläviraston ohjeita 41/2020). Kyseisessä ohjeessa määritellään myös laadunvalvonnan ja kelpoisuuden osoittamisen menettelytavat sekä ohje betonin P-luvun määrittämiseksi.

Infrabetonin lujuus- ja pakkasenkestävyysluokat ovat määritelty Eurokoodin soveltamisohjeessa – Betonirakenteiden suunnittelu NCCI 2 (Väyläviraston ohjeita 5/2022), jossa määritellään jokaiselle rakennusosalle betonin tarvittavat ominaisuudet ja luokat.

Standardin EN 1992-2 mukaan siltojen suunnittelussa tulee rajoittaa betonin lujuusluokat välille C25/30...C70/85. Infrabetonien suositeltavat lujuusluokat (taulukko 10) ovat rajattu kolmeen vaihtoehtoon C30/37, C35/45 ja C45/55. (Väyläviraston ohjeita 5/2022, s.10). Jouduttaessa valmistamaan lujuusluokaltaan suurempaa infrabetonia kuin C45/55 tai P-luvultaan suurempaa kuin P50, Infrabetonien valmistusohjeen mukaan betonilaadulle tehdään omat ennakkokokeet ja annetaan ohjeet mahdollisille kohdekohtaisille ennakkokokeille (Väyläviraston ohjeita 41/2020, s.19, 27).

*Taulukko 10. Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. Harmaalla on korostettu infrabetonien suositeltavat lujuusluokat. (mukaillen Väyläviraston ohjeita 5/2022, s.10).*

<b>Betonin lujuusluokka</b>									
$f_{ck}$ (MPa)	25	30	35	40	45	50	55	60	70
$f_{ck,cube}$ (MPa)	30	37	45	50	55	60	67	75	85
$f_{cm}$ (MPa)	33	38	43	48	53	58	63	68	78
$f_{ctm}$ (MPa)	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2
$E_{cm}$ (MPa)	31	33	34	35	36	37	38	39	41
$\epsilon_{c2}$ (‰)	2,0						2,2	2,3	2,4
$\epsilon_{cu2}$ (‰)	3,5						3,1	2,9	2,7
n	2,0						1,75	1,6	1,45
$\epsilon_{c3}$ (‰)	1,75						1,8	1,9	2,0
$\epsilon_{cu3}$ (‰)	3,5						3,1	2,9	2,7

Eurokoodin soveltamisohje – Betonirakenteiden suunnittelu NCCI 2 antaa sillan päällysrakenteelle infrabetonin vähimmäisvaatimukset lujuusluokalle, P-lukuarvolle ja betonipeitteelle. Taulukossa 11 on esitetty päällysrakenteen infrabetonin vähimmäisvaatimukset. Ympäristöolosuhteet määrittävät rasitusluokan R1...R4, joiden mukaan määräytyvät vähimmäisvaatimukset rakenteen infrabetonille. (Väyläviraston ohjeita 5/2022, s.24-25)

Taulukko 11. Betonirakenteiden vähimmäisvaatimukset: päällysrakenne. (mukaillen Väyläviraston ohjeita 5/2022, s.26).

Suunnitelmissa esitettävät asiat							
Sillan osa	Sillan osan tunnus	Rasitusluokkaryhmä	Vaatimukset			Suunnittelukäyttöikä	Rasitusluokat
			Lujuusluokka	P-lukuvaatimus	Raudituksen betonipeitteen nimellisarvo $c_{nom}$ [mm]		
Päällysrakenteen palkkien ja kansilaattojen vedeneristeen alla olevat pinnat sekä muut ei suolasumurasitetut pinnat	Ro20	R1 R2 R4	C30/37	P30	40	100	XC3, XC4, XF2
Päällysrakenteen palkkien ja kansilaattojen suolasumurasitetut pinnat	Ro21	R1	C30/37	P30	45	100 1)	XC3, XC4, XF2, XD1 XC3, XC4, XS1 XD1, XF2
		R2			40		
		R3					

Sillan päällysrakenteen infrabetonin vähimmäisvaatimuksille on myös laadittu tiukennettuja vaatimuksia siltakohtaisissa tyyppiirustuksissa. Ohjeet antavat mahdollisuuden suunnitella kansirakenteita ilman lujuuslaskentaa käyttäen suunnitelmaohjeiden päämittoja ja rakenneratkaisuja. Taulukossa 12 on määritelty teräsbetonisen ulokelaattasillan (Bul) suunniteluohjeen mukaiset infrabetonin lujuusluokat ja toteutusluokat. Ohjeen mukaan kansilaatan infrabetonin vähimmäislujuusluokka on C35/45 teräsbetonisella ulokelaattasillalla. (Liikenneviraston ohjeita 32/2017, s.8, 10)



*Taulukko 12. Teräsbetonisen ulokelaattasillan infrabetonin lujusluokan ja rakenteen toteutusluokan minimivaatimukset ja betonipeitteen nimellisarvon maksimiarvo (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 32/2017, s.8)*

Rakenneos	Betonin lujusluokka	Toteutusluokka	Betonipeitteen nimellisarvo, $c_{nom}$ [mm]
Paalujen betoni	C25/30	3	40
Peruslaatat	C25/30	2	50/100 <sup>1)</sup>
Pilarit	C30/37	3	45
Siipimuurit	C35/45	3	45
<b>Kansilaatta</b>	<b>C35/45</b>	3	45
Reunapalkki	C35/45	3	45
Siirtymälaatat	C30/37	2	40/50 <sup>2)</sup>
1) Maata / kalliota vasten 100 mm			
2) Alapinnassa 50 mm			

### 2.3 Siltakannen eristysalustan laatuvaatimukset

Eristysalustan laatuvaatimukset betonikannelle on esitetty InfraRYL:ssä (kohta 42310). Laatuvaatimusten lisäksi Liikennevirasto on julkaissut ohjeen vedeneristystyömaan laadunmittauksista. Laatuvaatimuksia ja tarkennettuja ohjeita noudattamalla vältetään yleisimmät laatua heikentävät työvirheet. Myös urakka-asiakirjoissa voidaan asettaa vedeneristystöille työkohtaisia lisävaatimuksia. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017)

Sillan vedeneristystyömaan laadunmittaus -ohjeessa (Liikenneviraston ohjeita 2/2017) on esitetty vedeneristystöiden kelpoisuuskokeet ja mittausmenetelmät sekä tulosten tulkinnan perusteet. Ohje on tarkoitettu työn laadunohjaukseen ja valmiin eristyksen kelpoisuuden osoittamiseen. Siltakannelta mitattavat laatuominaisuudet ja käytettävät mittausvälineet ovat lueteltuina taulukossa 13.

*Taulukko 13. Siltakannen eristysalustan tiiveys- ja vedeneristystöissä mitattavat laatuominaisuudet ja niissä käytettävät mittausvälineet (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.8).*

<b>LAATUOMINAISUUS (InfraRYL, osa 3)</b>	<b>MITTAUSVÄLINEET</b>
Eristysalustan absoluuttinen kosteus	Näytteenottovälineet ja lämpökaappi
Eristysalustan pintakosteus	Pintakosteusmittari
Eristysalustan tasaisuus	1,5 m oikolauta ja mittakila
Eristysalustan makrokarkeus	Lasihelmimenetelmän mittausvälineet
Olosuhteet eristysalustan tiivistystyön, vedeneristystyön sekä tiivistysainekerroksen lujittumisen aikana	Ilmanlämpömittari Ilmankosteusmittari Pintalämpömittari
Eristysalustan tiivistyksen vesitiiveys	Vesitiiveyden määrityslaitteet varusteineen, eristysvastusmittari (matalajännitemenetelmä), kipinäharava (korkeajännitemenetelmä)
Nestemäisenä levitetyn eristyksen kerrospaksuus	Kerrospaksuuden määrityslaite varusteineen
Eristysalustan tiivistyksen ja vedeneristyksen tartunta alustaan	Tartuntavetolaite varusteineen

Mittaustulokset tulee aina dokumentoida kirjallisesti ja tallentaa laadunmittauksen jälkeen urakan loppuraporttiin. Mittaustulokset tulee olla seuraavan urakoitsijan saatavissa ja tilaajan valvojan käytettävissä ennen seuraavien työvaiheiden aloittamista. Projektitietopankit ovat hyviä dokumenttien säilytyspaikkoja, joista ne ovat saatavilla jokaiselle osapuolelle. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.8-9)

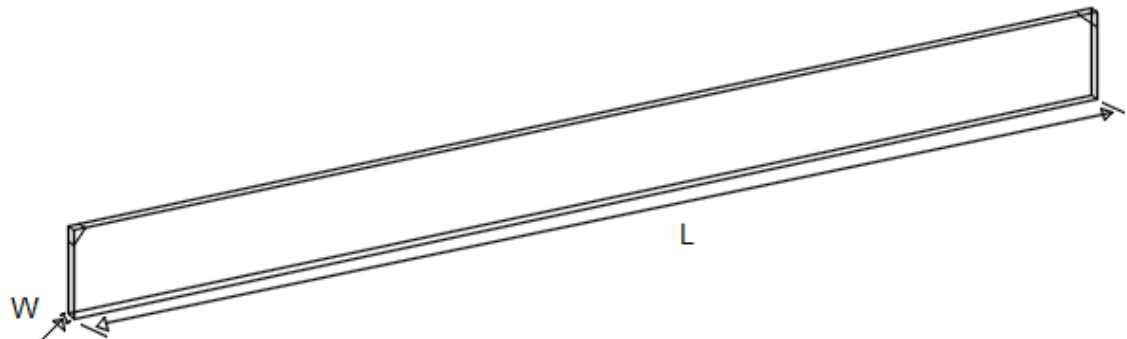
### **2.3.1 Eristysalueen puhtaus**

Tartunnan varmistamiseksi sillan eristysalueen pinnasta tulee poistaa sementtiliima, jälkihoitoaine, liuottimet, öljy, rasva ja muut epäpuhtaudet. Puhdistus tapahtuu sinko- tai hiekkapuhalluksella ja pinta imuroidaan ennen eristystyötä. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.10)

Jälkihoitoaineen ollessa vahapohjainen, voidaan käyttää testimenetelmää VTT-TEST 375-93. Menetelmässä tutkittavalle betonipinnalle imeytetään vesiväriä. Betonipinta, joka värjäytyy vesiväriin mukaisesti, voidaan todeta puhtaaksi käytetystä jälkihoitoaineesta. Vahapohjainen jälkihoitoaine estää vesiväriin imeytymisen betoniin. Mitattu alue dokumentoidaan sillan tasopiirroksen lomakkeelle 2.1 ”Laadunmittauskohtien sijainti siltakannella” ja liitetään tutkimusselostukseen. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.29-30)

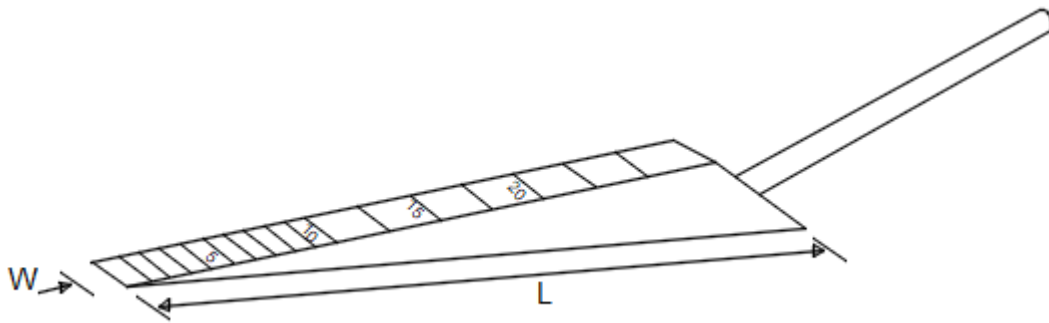
### 2.3.2 Eristysalueen tasaisuus

Eristysalueen tasaisuus mitataan menetelmän SFS-EN 13036-7 tai PANK-5102 mukaan. Menetelmässä käytetään  $(1500 \pm 5)$  mm pituisia ja  $(25 \pm 5)$  mm paksuisia oikolautaa, josta mitataan laudan kantan ja alustan välistä etäisyyttä (=raon korkeutta). Oikolauta tulee olla jäykkä, eikä se saa poiketa suorasta enempää kuin  $\pm 1$  mm. Mittauskantti tulee olla selvästi merkitty. Kuvassa 4 on esitetty oikolaudan periaatekuva. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.10)



Kuva 4. Oikolauta (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.10).

Rakoa mitataan metallisella mittauskiilalla, jonka pituus on  $(300 \pm 3)$  mm ja leveys  $(25 \pm 1)$  mm. Kiilan kaltevalle tasolle merkitään korkeusasteikko yhden millimetrin välein. Kuvassa 5 on esitetty mittakiilan periaatekuva. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.10)



Kuva 5. Mittakiila (mukaillen Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.11).

Ennen mittausta tulee varmistaa, ettei mitattavalla pinnalla ole irtoainesta. Epätasaisuuden mittaus tapahtuu pituus- ja poikkisuuntaan. Pituussuuntaisen epätasaisuuden mittaus tapahtuu asettamalla oikolauta tien keskiviivan suuntaisesti sillan kannelle. Poikkisuuntaisessa epätasaisuuden mittauksessa tulee oikolauta asettaa tien keskiviivan nähden kohtisuoraan. Tutkimusselostukseen kirjataan mahdollisimman tarkasti menetelmäkuvaus ja mahdolliset epätasaisuudet ja niiden sijainti siltakannella. Riittävän tasaisuuden ohella on oleellista, ettei vesi pääse lammikoitumaan siltakannella. Mahdolliset lammikoitumiskohdat tulee korjata ennen vedeneristystöiden aloittamista. (PANK-5102, s.3-4; Vuorikoski 2022).

### 2.3.3 Eristysalustan makrokarkeus

Eristysalueen karkeudella tarkoitetaan pinnan pienimuotoista epätasaisuutta. Karkeus mitataan pinnalle levitettyjen pienten lasihelmien avulla ohjeen PANK-5103 mukaan, mikä vastaa sisällöltään eurooppalaista standardia SFS-EN 13036-1. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.12)

Mitattava kohta tulee olla kuiva ja tasalaatuinen alue ilman yksittäisiä paikallisia eroja, kuten halkeamia tai saumoja. Mittauksen alussa alue puhdistetaan pölystä, roskista ja irrallisista pintakiviainesrakeista ensin teräsharjalla ja sen jälkeen pehmeällä jouhiharjalla. Mittauskohdan suojaksi asetetaan tuulensuoja, jottei ilmavirtaus pääsisi häiritsemään mittausta. Kuvassa 6 on kuvattuna makrokarkeuden mittaustapa.



*Kuva 6. Eristysalueen makrokarkeuden määrittäminen (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.12).*

Mittauksessa kaadetaan 25 ml pieniä lasihelmiä puhdistetulle koealueelle kasaan ja levitetään levitystyökälulla tasaisesti ympyränmuotoiseksi alueeksi. Levitystyökälua tulee painaa alustaan vasten vain vähän, että levitin koskettaa pintakiviaineksen osasten huippuja. Lasihelmiympyrän halkaisija mitataan vähintään neljästä kohtaa, joista mittaustulokseen otetaan keskiarvo. Mittaus tulee tehdä vähintään neljässä satunnaisesti valitussa mittauskohdassa. (PANK-5103, s.2-3)

Sillan eristysalustan karkeustietoja käytetään betonikannen ja eristyksen väliseen tartuntaominaisuuksien arviointiin. Liian sileä betonin pinta heikentää tartuntalujuutta. Myös betonin tasoitetarve, eristysalueen tiivistysaine-, pohjustusaine- tai liimausbitumimenekin tarve voidaan arvioida mittaustuloksista. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.12)

#### **2.3.4 Eristysalueen kosteus**

Eristysalue tulee saada tarpeeksi kuivaksi, jotta vedeneristysmateriaalin tartuntalujuus olisi riittävä. Kannen betonin absoluuttinen kosteus tulee olla InfraRYL:n (42310.2) mukaan alle 5.0 p-%, kun vedeneristeenä käytetään kauttaaltaan kiinnitettyä kermiä,

nestemäistä vedeneristettä tai tiivistyskäsittelyä. Kosteuden mittauksessa käytetään aluksi pintakosteusmittaria (kuva 7), joka kuuluu ainetta rikkomattomaan menetelmään. Mittaus tapahtuu pintakosteusmittarilla niin kauan, kun ylittäviä arvoja ei enää löydy. Tämän jälkeen siirrytään kuivatus-punnitus menetelmään, jossa absoluuttinen kosteus mitataan näytteestä, joka on irrotettu 30 mm syvyydelle ulottuvasta näytteestä. (InfraRYL 2021, 42310.2)



Kuva 7. Vasemmalla pintakosteusmittari ja oikealla puntari (Rateko 2021).

Kuivatus-punnistus menetelmässä absoluuttinen kosteus mitataan siten, että porataan näytteenottopala poralla (n. Ø 55 mm) 30 mm syvyyteen. Lieriönäyte irrotetaan kiilalla lyömällä porattuun uraan. Näytteestä punnitaan alkupaino, jonka jälkeen näytettä kuivataan uunissa (105 °C). Kuivattu näyte punnitaan kerran päivässä niin kauan, ettei paino enää alene. Vertaamalla vähentynyttä massaa alkuperäiseen painoon, saadaan absoluuttinen kosteuspitoisuus selville. Menetelmä tulee tehdä esimerkiksi betonilaboratoriossa, josta löytyvät tarvittavat laitteet absoluuttisen kosteuden määrittämiseksi. (Rateko 2021)



Absoluuttisen kosteuden mittauksen näytteenottokohtat merkitään lomakkeelle 2.1 ”laadunmittauskohtien sijainti siltakannella” ja liitetään tutkimusselostukseen. Näytteiden määrään annetaan ohjeet urakka-asiakirjoissa. Yhdestä kohtaa tehtävää absoluuttisen kosteuden määrittystä varten otetaan kolme rinnakkaisnäytettä samalta etäisyydeltä reunapalkista ja noin 50 cm etäisyydeltä toisistaan. (Rateko 2021)

### 2.3.5 Tiivistys ja eristystöiden sääolosuhteet

Vedeneristeen onnistumisen varmistamiseksi tiivistys- ja vedeneristystyöt suoritetaan sääsuojan sisällä. Kuvassa 8 näkyy hyvin asennettu sääsuoja. Sääsuojan sisäpuolen korkeus tulee olla vähintään 2.5 m ja ulottua sillan päästä päähän. Sääsuojan tulee olla päistä tuuletettavissa ja tarvittaessa lämmitettävissä. Sillan kannelle ei tulisi päästä kondenssi- tai hulevesiä, eikä pölyä. (Rateko 2021)



*Kuva 8. Asianmukainen sääsuoja (Rateko 2021).*

Eristystyön aikana ilman suhteellinen kosteus tulisi olla enintään 85 % (RH) ja eristysalustan pintalämpötilan vähintään 3 °C ilman kastelämpötilan yläpuolella. Epoksin levityksen ja kovettumisen aikana lämpötilan tulee olla vähintään +10 °C ja kermieristyksen aikana vähintään +5 °C. Materiaalitoimittajien lämpötilavaatimuksia tulee noudattaa, jotta lopputulos olisi mahdollisimman hyvä. (Rateko 2021)

Eristysalustan tiivistys- ja vedeneristystöiden aikana tulee seurata ilman suhteellista kosteutta, lämpötilaa, kastepistelämpötilaa, eristysalueen pintalämpötilaa ja eristysalustan pintalämpötilan muutoksen suuntaa tiivistystyön ja tiivistysaineen kovettumisen aikana. Sääolosuhteiden mittaustulokset tulee tallentaa ja liittää työmaan laatudokumentteihin. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.14-15)

## 2.4 Siltakannen esikäsitteily

Betonikansi yleensä esikäsitellään kuplimisen välttämiseksi epoksilla tai tiivistys- tai esikäsitteilyaineella. Kumibitumiliuoksen tarkoitus on lähinnä parantaa bitumipohjaisen eristeen tartuntaa (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.33, 53). Tiivistys tulee tehdä aina laskevaan lämpötilaan kahtena kerroksena valmistajan tuotekortin ohjeita noudattaen. Tiivistyksen pinta tulee jäädä karkeaksi, jotta tuleva vedeneristys saisi hyvän kiinnittymispinnan. Käytetty ainemäärä tulee raportoida työmaan laadunmittaustuloksissa. (InfraRYL 2021, 42310.3)

Valmiin tiivistyksen tulee olla vesitiivis. Mittaus vesitiiveydelle tapahtuu korkea- ja matalajännitemenetelmällä. Molemmissa menetelmissä mitataan tiivistyskerroksen sähköneristyskykyä. Kohdissa, jossa tiivistyskerros on ohut, huokoinen tai reikäinen, menetelmä huomaa sähkönjohtavuuden olevan heikko. Matalajännitemenetelmä suoritetaan VTT 2654-17 -ohjeen mukaisesti. Mittauksessa käytetään 500 V jännitettä, joka on turvallinen käyttäjälle, eikä se vaurioita pinnoitetta mittausräikiä lukuun ottamatta. Korkeajännitemenetelmä (=kipinäharavamenetelmä) suoritetaan VTT-S-05050-09-2017 -ohjeen mukaisti. Mittauksessa haetaan riittävän korkea jännite, joka läpäisee pinnoitteen. Mittalaite kalibroidaan kullakin mittauskohteella ja määritetään kyseisen kohteen ns. läpilyöntijännite, jota käytetään mittausohjeen mukaisesti joko sellaisenaan mittausjännitteenä tai siitä tehdään 200-300V mittausjännitteen vähennys. Jokainen mittalaitteen aiheuttama läpilyönti rikkoo mitattavan pinnoitteen kyseiseltä kohdalta ja tästä syystä kaikki laitteen havaitsemat läpilyöntikohdat tulee merkitä siltakanteen huolellisesti paikkausta varten. Läpilyönnin aiheuttaa tavallisesti liian ohut ainekerros, huokoisuus tai reikä mittavassa pinnoitteessa/tiivistysaineessa. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.21-22; Vuorikoski 2022)



Löytyneet pinnoitekerroksen liian ohuet kerrokset ja reikäkohdat merkitään näkyvällä tavalla ja paikataan mahdollisimman pian. Paikkaustyössä tulee huomioida, että paikattava alue tulee olla puhdas ja kuiva. Paikattavat alueet karhennetaan, jotta paikkauksen tartunta olisi riittävä. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.23)

Tiivistyskerroksen tartuntalujuuden tulisi olla joka kohdassa vähintään 1.0 MPa ja keskimäärin 1.5 MPa (InfraRYL 2021, 42310.3). Tartuntalujuutta mitataan tartuntavetolaitteilla (esimerkki tartuntavetolaitteesta kuvassa 9). Vetokokeen aikana laite lisää vetovoimaa vakionopeudella ja ilmoittaa tuloksen näytetalan irrotessa alustastaan. Mittauskohdat valitaan siltakannelta silmämääräisesti havainnoiden heikoimmista kohdista. (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.18-20)



*Kuva 9. Tartuntavetolaite (Liikenneviraston ohjeita 2/2017, s.19).*

## 2.5 Siltakannen kermieristys

Kannen vedeneristyksen tulee olla reunoja myöten vesitiivis. Yleisissä laatuvaatimuksissa todetaan, että eristys ja sen saumat tulee kestää vuotamatta siltapaikalla vallitsevien ilmasto-olosuhteiden, vedenpaineiden ja liikenteen aiheuttamat rasitukset sekä lämpötilakuormista ja kutistumista aiheutuvat muodonmuutokset. Eristyksen tulee kestää myös sillalla esiintyvien tiesuolojen, laimeiden happojen ja emästen vaikutuksia. (InfraRYL 2021, 42310)

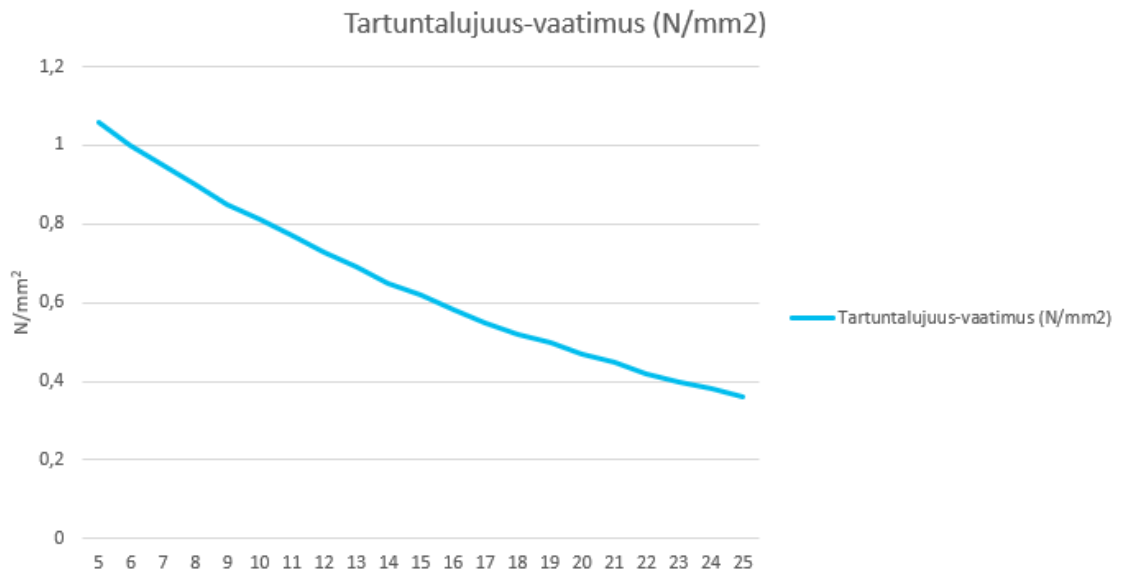
Vedeneristyksen yleisissä laatuvaatimuksissa (InfraRYL 2021, 42310) kerrotaan, ettei eristeen päällä saa kulkea työkoneella tai muulla ajoneuvolla ennen vedeneristeen suojakerroksen asentamista. Mikäli eristyksen päällä halutaan säilyttää työkalustoa tai -materiaalia, tulee eristys suojata vähintään 5 mm:n paksuisilla vanerilevyillä.

Kaksinkertaisen kermieristyksen asentamisessa käytettävä kumibitumi saa olla korkeintaan +210 °C, ellei SILKO-tuoteluetteloon ole merkitty tuotekohtaisesti poikkeavaa sekoituslämpötilaa. Kumibitumipadassa tulee olla toimiva termostaatti, lämpömittari ja sekoitin. (InfraRYL 2021, 42310.3)

Kermien asennus tapahtuu pituussuuntaan ja niiden asennus aloitetaan korkeusasemaltaan kannen alimmasta kohdasta. Limitykset tulee olla vähintään 100 mm pituussuuntaan (sivusauma) ja poikkisuuntaan 150 mm (päätysauma). Päälle tuleva kermi limitetään vähintään 100 mm alemman kermin saumojen suhteen. Kermin ja alustan väliin ei saa jäädä ilmataskuja.

Kermien tartuntalujuusvaatimuksen toteutuminen siltakannella mitataan tartuntavetolaitteella VTT 2651-17-ohjeen mukaisesti. Tartuntalujuusvaatimus vaihtelee eristysalustan pintalämpötilan mukaan. Taulukossa 14 on esitetty kermien tartuntalujuusvaatimus eristysalueen lämpötiloissa. Tartuntavetolujuus heikkenee huomattavasti lämpötilan kasvaessa. Tartuntavetolujuuksia on testattu myös taulukon 14 asteikkoa kuumemmilla lämpötiloilla ja on huomattu, että kermi menettää lähes kokonaan tartuntaominaisuutensa lämpötilan kohotessa yli 30 °C (Kuronen 2022).

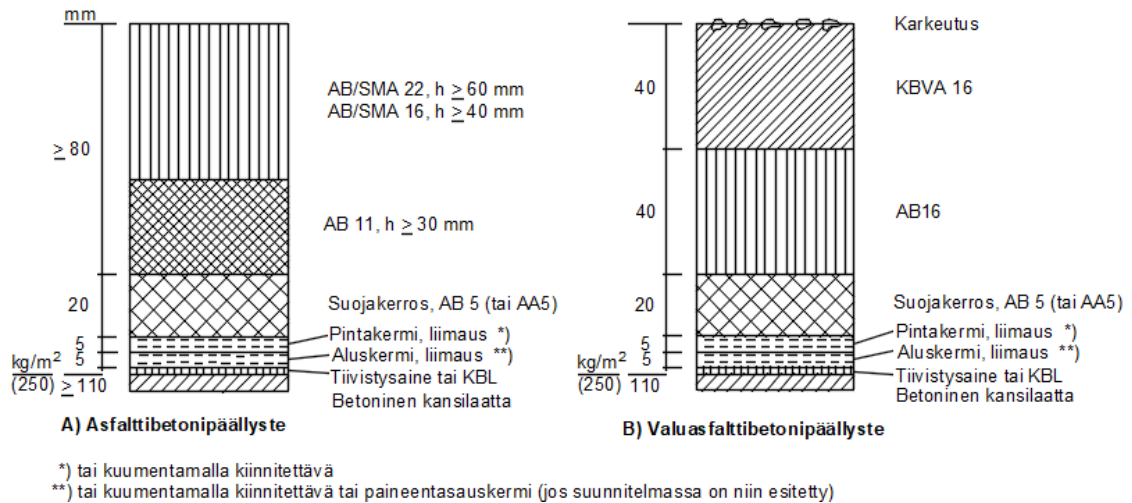
Taulukko 14. Kermieristyksen tartuntalujuusvaatimus siltakannella (mukaillen InfraRYL 2021, 42310:T2).



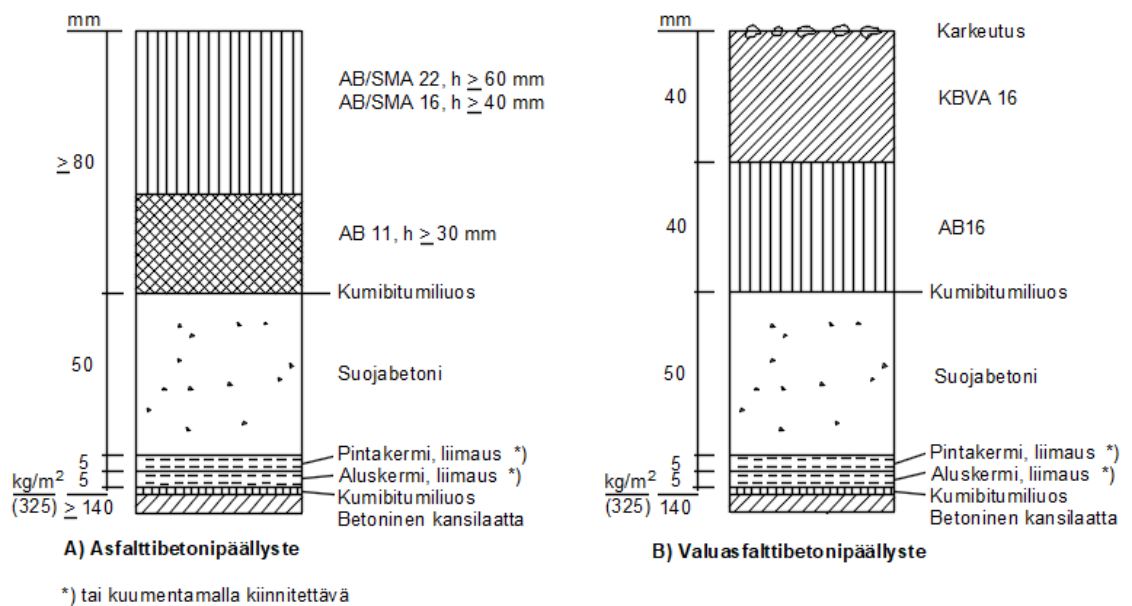
## 2.6 Siltakannen pintarakenteet

Sillankannen pintarakenteisiin kuuluvat päällystekerrokset, vedeneristyksen suojakerros ja vedeneristys. Pintarakenteiden tarkoitus on suojata siltakansi kulutukselta, kosteudelta ja klorideilta. Pintarakenteet pidentävät siltarakenteen käyttöikä ja korjausväliä huomattavasti. (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.32).

Ajoradallisten siltojen (kuva 10 ja kuva 11) pintarakenteiden päällystekerrokset jakaantuvat yleisesti kulutuskerrokseen ja sen alapuoliseen sidekerrokseen. Kulutuskerros on yleisimmin joko asfalttibetonipäällyste (AB 22 / AB 16), kivimastikiasfaltti (SMA 22 / SMA 16) tai valuasfalttipäällyste (KBVA 16). Sidekerroksena toimii asfalttibetoni (AB 11 / AB 16). Vedeneristeen suojakerroksena toimii kuvan 10 mukainen asfalttibetoni (AB 5) tai kuvan 11 mukainen 50 mm suojabetoni. (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.52-53).



Kuva 10. Betonikantisen sillan ajorata. Kermieristeinen pintarakenne ilman suojabetonilaattaa (mukaien Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.52).

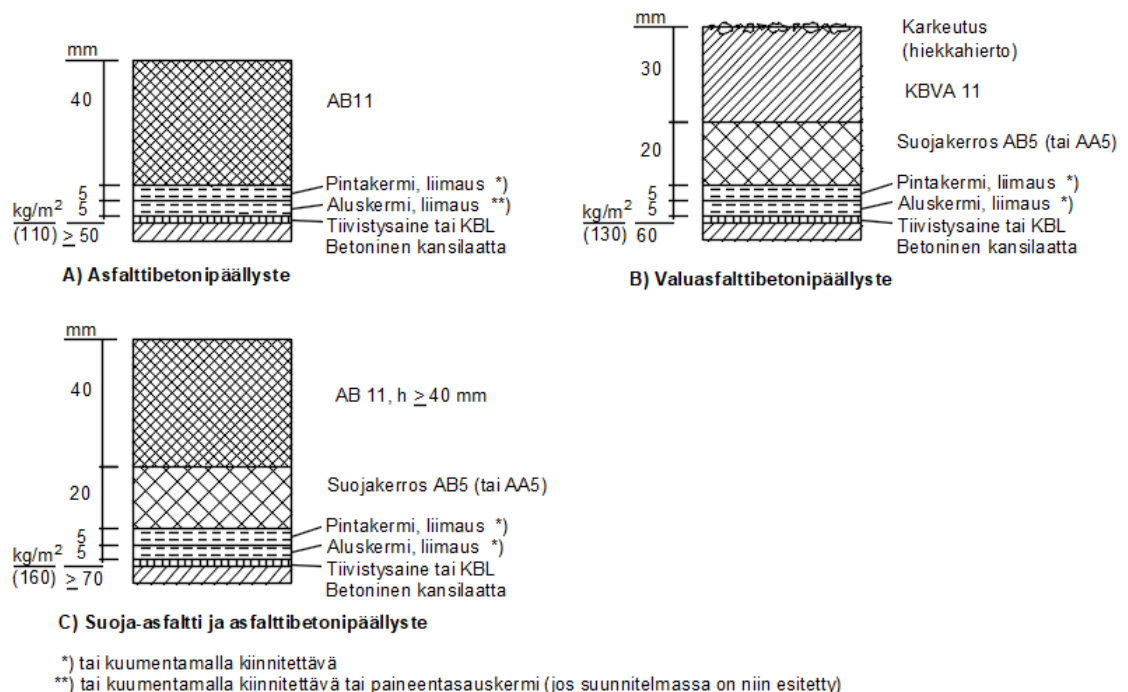


Kuva 11. Betonikantisen sillan ajorata. Kermieristeinen pintarakenne käytettäessä suojabetonilaattaa (mukaien Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.53).

Suojakerroksen tarkoituksena on pitää vedeneristys betonikannen pinnassa ehjänä, jotta kosteus ja kloridit eivät pääsisi haurastuttamaan pintarakenteiden alapuolista betonikantaa. Suojabetonin (kuva 11) tehtävä suojakerroksena on myös omalla painollaan estää haitallinen vedeneristykseen kupliminen. (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.32).

Suojakerros tehdään 50 mm:n paksuisena laattana suojabetonista, johon asennetaan harjateräsverkko tai teräskuituja suunnitelma-asiakirjojen mukaisesti. Suojabetonissa käytetään C35/45 betonia, jonka pakkasenkestävyysarvona tulee olla P50. Suojabetonin valmistuksessa, laadunvalvonnassa ja kelpoisuuden osoittamisessa noudatetaan InfraRYL:n luvun 42020 ohjeita. Ennen side- tai kulutuskerroksen asentamista suojabetonin kosteuspitoisuus tulee olla asfalttibetonia käytettäessä alle 6 p-% ja valuasfalttia käytettäessä alle 5 p-%. Suojabetoni suositellaan tehtäväksi sääsuojan sisällä, jotta betonin valu olisi suojassa sateelta ja betonin kuivatus tehostuisi. (InfraRYL 42320).

Kevyenliikenteen silloilla (kuva 12) kulutuskerroksena toimii asfalttibetoni (AB 11) tai valuasfaltti (KBVA 11). Varsinaista sidekerrosta ei tarvita vähäisen liikennekuormituksen vuoksi, joten kulutuskerroksen alla on joko suoraan vedeneristys tai vedeneristyksen suojakerros asfalttibetoni (AB 5) tai avoin asfalttikerros (AA5). (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.53). Suoja-asfaltin vaatimukset tulee täyttää InfraRYL kohdan 21411 vaatimukset.



Kuva 12. Kevyen liikenteen betonikantainen silta- Kermieristeinen pintarakenne (mukaillen Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.53).

Kuvien 10, 11 ja 12 pintarakenteet ovat esimerkkejä tyypillisimmistä betonikantisista kermieristeisistä pintarakenteista. Hyvin vilkkaasti liikennöidyillä silloilla kerrosten paksuudet ja materiaalit voidaan sopia tilaajan kanssa erikseen. Paksummat päällystekerrokset ja isommat raekoot parantavat päällysteen kestävyyttä. (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.52).

Suunnittelijan tulee valita siltakohtaisesti parhaiten soveltuva pintarakenneratkaisu ja esittää se tilaajan hyväksyttäväksi. Päällystekerrosten tulee olla laadultaan vähintään saman tasoinen ympäröivän väylän kanssa ja eristystyyppin lisäksi tulee määrittää eristysalustan käsittelytapa ja suojaus. (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.35).

### 3 SILLAN KANNEN KUPLIMINEN

Laukkanen ym. (1998) ovat tutkineet siltojen vedeneristeen kuplimisongelmaa ja ovat pyrkineet selvittämään ongelman syyt teoreettisilla laskelmilla ja kokeellisesti 1990-luvulla olleiden tietojen valossa. Tutkimuksessa tutustuttiin eri maiden vedeneristysmenetelmiin ja kartoitettiin Suomen siltojen kuplimisongelman laajuutta sekä kirjoitettiin analyysi aiheesta tehdyistä koti- ja ulkomaisista tutkimuksista. Kokeellisissa tutkimuksissa pyrittiin simuloimaan kuplimista ja kehitettiin toimintatapoja vähentää kuplimista. (Laukkanen ym. 1998, s.84)

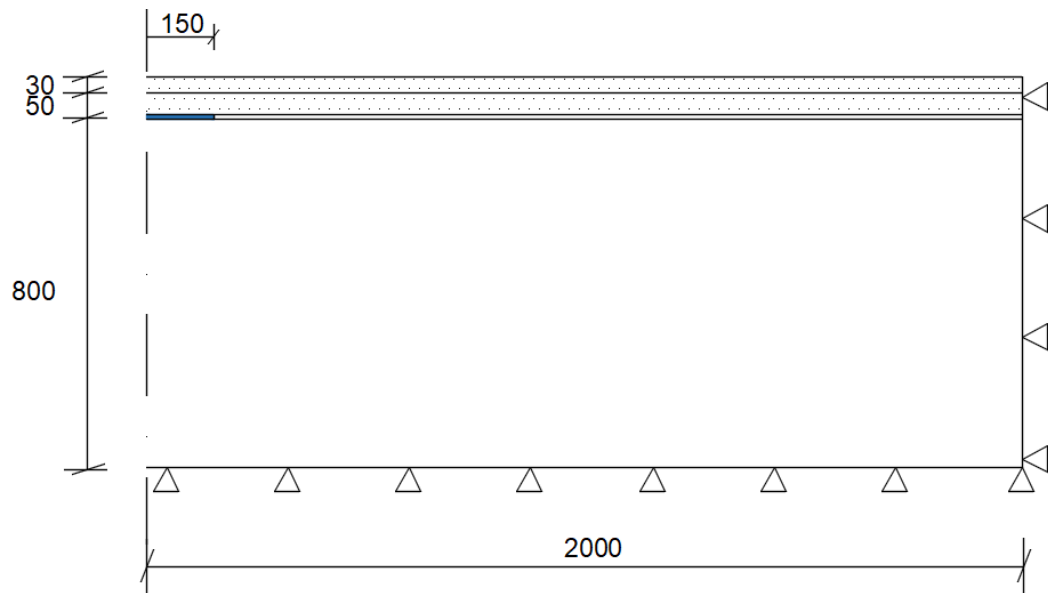
Yleisimpiä syitä kuplimisen aiheuttajiksi Laukkasen ym. (1998, s.91-92) tutkimuksessa olivat betonirakenteen suuret kosteuspitoisuudet ja betonin huokoisuus sekä työvirheet. Monet uudemmat suomalaiset tutkimukset siltojen kuplimisilmiöstä, kuten esimerkiksi Laukkanen (2005), Pakanen (2014) ja Julku (2016), pohjautuvat Laukkasen ym. (1998) tekemään tutkimukseen, jossa kuplan syntymekanismiin vaikuttaa pääasiassa vesipitoisuus betonirakenteessa.

#### 3.1 Kuplimisen syntymekanismi

Haitallisen kuplimisilmiön ympärillä on tehty tutkimuksia muun muassa kuplimisen syntymekanismiin ymmärtämiseksi. Puolan teiden ja siltojen tutkimuslaitos on tehnyt Varsovan yliopiston kanssa tutkimuksen numeerisesta kuplimisen mallintamisesta, jossa on etsitty ymmärtämistä kuplan muodostumiselle. (Graczyk et al. 2016, s.3925)

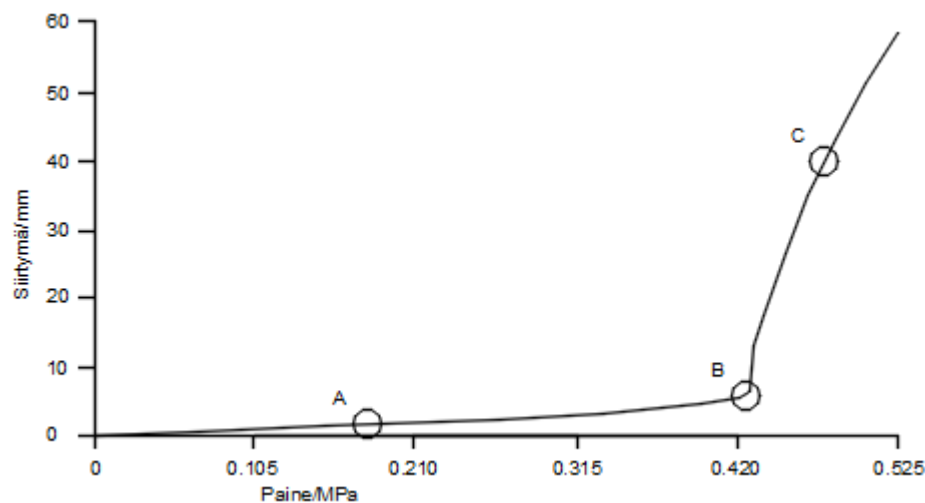
Puolassa siltojen pintarakenteissa käytetään myös suurimmaksi osaksi kumibitumikermiä vedeneristeenä, kuten Suomessakin, mutta pintarakenteet koostuvat suojakerroksesta 50 mm ja kulutuskerroksesta 30 mm (Sarnowski et al. 2014, s.326). Tutkimuksessa mallinnettiin teoreettinen kuplan muodostuminen Abaqus FEM-ohjelmalla. Kuvassa 13 on mallinnettu 2000 mm leveä sillan kansi, joka peilaantuu symmetria-akseliin nähden samanlaisena akselin vasemmalle puolelle. Sillan kansi on suunniteltu 800 mm korkeaksi ja teoreettinen vesikertymä (sinisellä viivalla) on mallinnettu vedeneristeen alle. Veden määrä vedeneristeen alla on ohut 300 mm pitkä kaista. Laskentamalli on tuettu alhaalta

ja reunoilta, joten ainoa liike tapahtuu vain veden kaasuuntuessa pintarakenteista ylöspäin. (Graczyk et al. 2016, s.3927)



Kuva 13. Mallin geometria ja reunaedot (mukaillen Graczyk et al. 2016, s.3927).

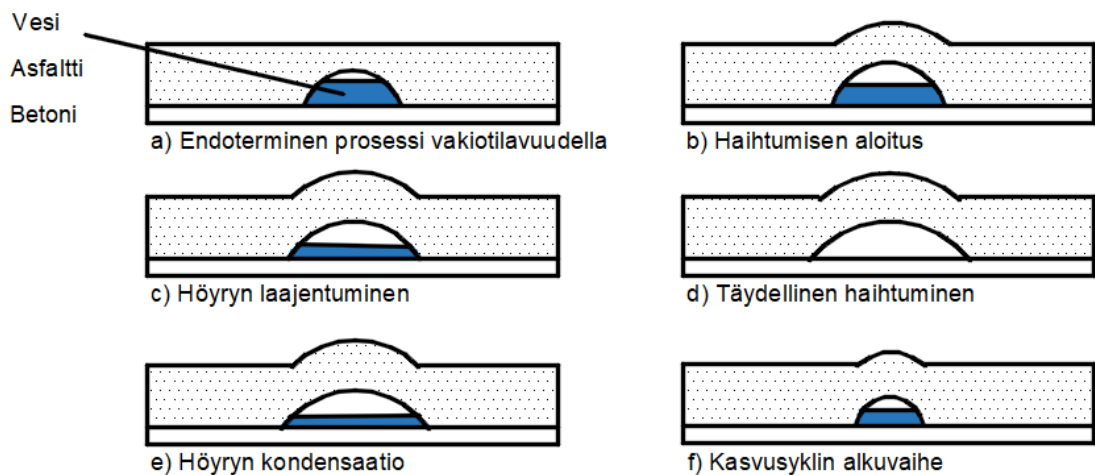
Tutkimuksessa todettiin, että 0.45 MPa paine riittää irrottamaan kumibitumikermin alustastaan. Tutkimuksessa tutkittiin myös pintarakenteen jännityksiä ja todettiin, että suurin jännitys havaitaan pintarakenteen pinnassa kuplan keskellä juuri ennen kermin irtoamista alustastaan. (kuvan 14 pisteessä B). (Graczyk et al. 2016, s.3932-33)



Kuva 14. Kumibitumikermin irtoaminen laskennallisesti ja jännitysten arvot eri kuplan muodostumisen vaiheissa (mukaillen Graczyk et al. 2016, s.3932).

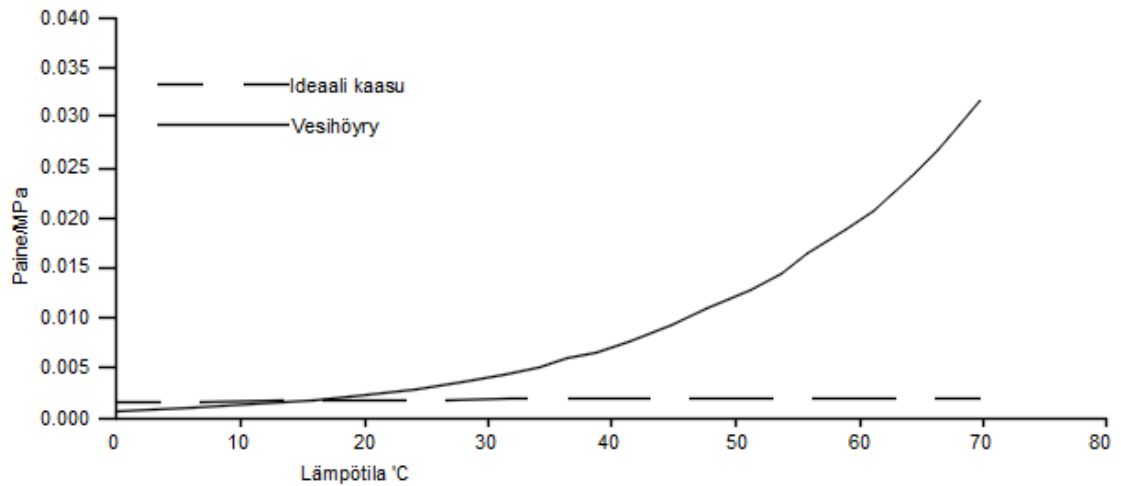


Kiinassa tehdyssä simulaatiotutkimuksessa (Liao & Lou 2022) oletettiin veden olevan pintarakenteen alla. Lämpötilan noustessa ja veden höyrystyessä kupla muodostuu ja laajenee syklisen vaikutuksen vuoksi. Kuvassa 15 on kuvattu termodynaamisen syklin vaikutus kuplan muodostumiseen. Yksinkertaistettuna kuvan 15 kohdat a) ... d) kuvaavat, kuinka vesi lämpötilan noustessa höyryyntyy ja aiheuttaa kuplan pintarakenteeseen. Kuvan kohdat e) ja f) kertovat rasituksen dynaamisesta vaikutuksesta. (Liao & Lou 2022, s.2)



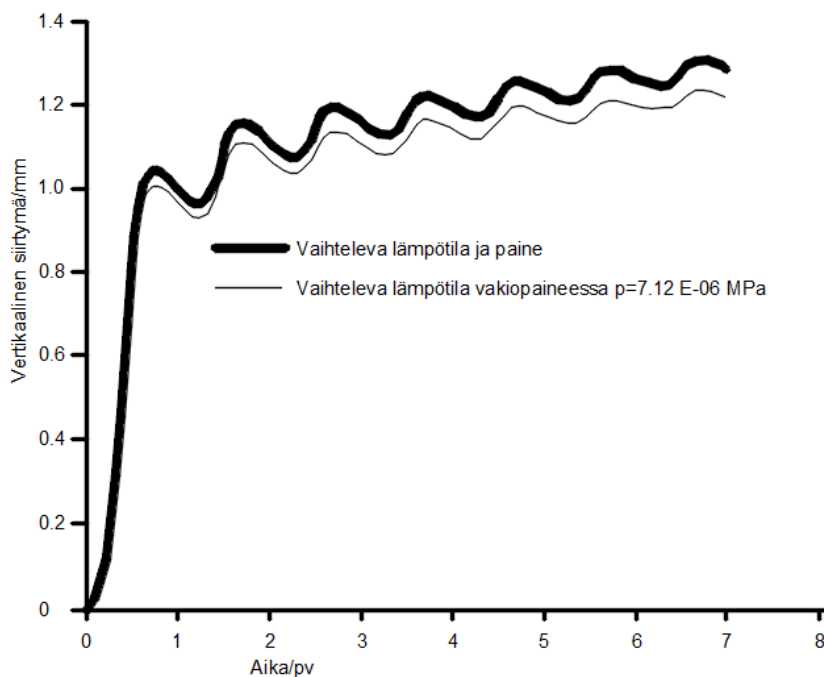
Kuva 15. Termodynaaminen sykli kuplan muodostumisessa (mukaillen Liao & Lou 2022, s.2).

Tutkimuksessa havainnollistettiin, että dynaamisen kuormituksen vuoksi sillankannen pintamateriaalit menettävät osan lujuudestaan ja tällöin kupla pääsee muodostumaan. Tutkimuksessa todettiin myös, ettei pelkkä ilmatasku vedeneristeen alla kykene muodostamaan niin isoa painetta, jotta sykliselläkään kuormituksella kupla pääsisi muodostumaan. Kuvassa 16 on esitetty ideaalikaasun ja höyrynpaineen muodostavat paineet. Ideaalikaasu edustaa ilmataskua vedeneristeen alla. (Liao & Lou 2022, s.3-6)



Kuva 16. Ideaalikaasun ja vesihöyryn paineet (mukaillen Liao & Lou 2022, s.3).

Myös Hailelassie & Partl (2012) ovat tutkineet kuplan muodostumisen mekanismia. Tutkimuksessa havainnollistettiin, kuinka kupla laajenee syklisessä lämpötila- ja painerasituksessa seitsemän päivän aikana (kuva 17). Simulaatio osoitti, että kupla kasvaa jatkuvasti toistuvien rasitusten vuoksi. Tutkimus osoitti myös, että pintarakenteiden painon lisääminen vähentää kuplan muodostumista. (Hailelassie & Partl 2012, s.14-15)

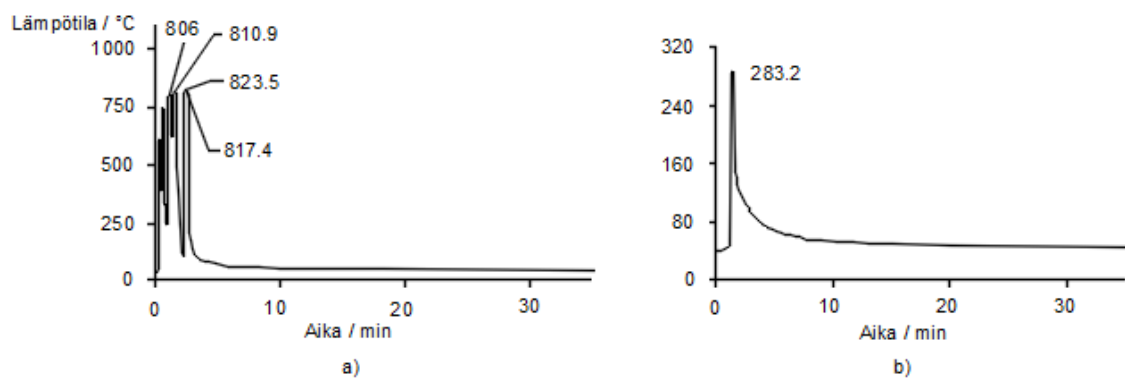


Kuva 17. Pystysuuntainen kuplan taipuma syklisen lämpötila- ja painejaksojen aikana (mukaillen Hailelassie & Partl 2012, s.14).

### 3.2 Lämpötilan vaikutus siltakannen kuplimiseen

Chmielewska et al. (2018) on tehnyt tapaustutkimuksen siltakannen rakentamisaikaisista lämpötilakuormista. Tutkittavan teräsbetonisen sillankannen paksuus oli 800 mm ja betonin lujuusluokka C35/45. Lämpötila-anturit asetettiin betoniin siten, että ylimmät anturit olivat 10 cm syvyydellä betonikannen pinnasta, keskimmäiset anturit sijoituivat betonirakenteen keskelle ja alimmat anturit 5 cm betonirakenteen pohjapinnan yläpuolelle. Lisäksi mitattiin betonikannen lämpötiloja lämpökameralla. Tutkittavan betonikannen osa eristyksestä tapahtui kumibitumikermillä ja suojakerros suodatinkankaalla ja suojahiekalla ja osa kannesta vedeneristettiin mastiksiasfaltilla (MA) ja päällysteeksi koko sillalle asennettiin kivimastiksiasfaltti (SMA). (Chmielewska et al. 2018, s.104-105)

Vedeneristeen asentamiseen kuului siltakannen pohjustus kumibitumiliuoksella, jonka jälkeen kumibitumikermit liimattiin siltakanteen kiinni kaasupolttimella. Suurimmat kermin lämpötilat olivat välillä 750 - 823 °C heti polttimen kosketuksen jälkeen. Kuvassa 18 on kuvattu lämpötilavaihtelut vedeneristyksen asennuksen aikana. (Chmielewska et al. 2018, s.110-111)

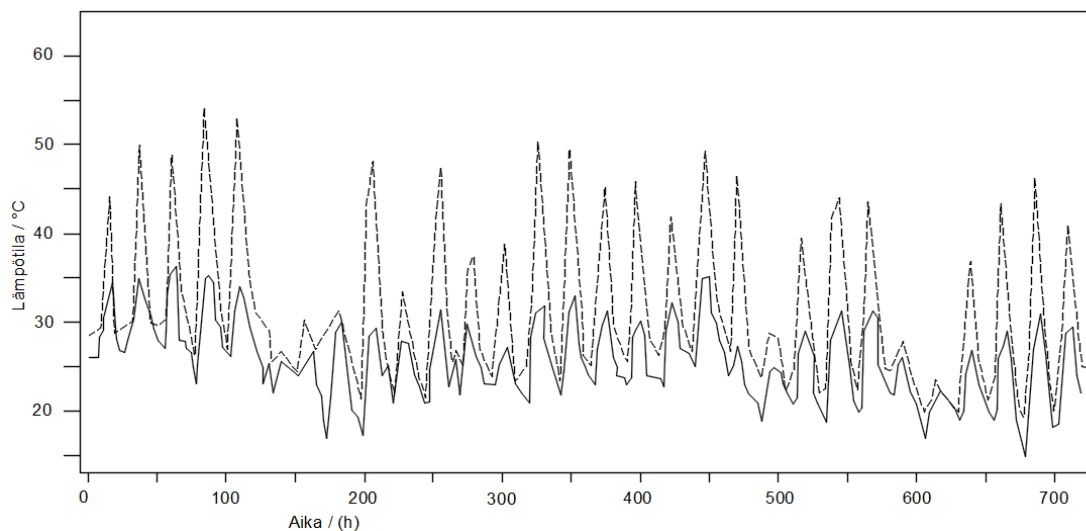


Kuva 18. Kumibitumikermieristyksen mitatut lämpötilat: a) kermin lämpötila liekkikosketuksen jälkeen, b) kermin lämpötila, kun kermi asennetaan betonikannelle (mukaillen Chmielewska et al. 2018, s.110).

Tutkimuksessa mitattiin myös mastiksiasifaltin ja kivimastiksiasifaltin asennusaikaiset lämpötilat. Mastiksiasifaltin levityslämpötila oli noin 240 °C ja kivimastiksiasifaltin asennuslämpötila 170 - 180 °C. (Chmielewska et al. 2018, s.111)

Tutkimuksessa todettiin, että pintamateriaalien asentaminen betonikannelle nostaa rakenteen lämpötilaa huomattavasti. Kumibitumieristeen asentaminen nosti betonikannen pintalämpötilan arvoihin 70 - 140 °C, josta palautuminen lämpötilan 40 °C alapuolelle kesti 12 – 20 minuuttia. Mastiksiasifaltin (MA) asentaminen nosti betonikannen pintalämpötilaa arvoihin 60 - 80 °C, josta palautuminen lämpötilan 40 °C alapuolelle kesti 220 minuuttia. Kivimastiksiasifaltin (SMA) asentaminen nosti betonikannen lämpötilaa arvoon 40 °C, josta palautuminen lämpötilan 30 °C alapuolelle kesti 3 tuntia. (Chmielewska et al. 2018, s.112)

Kiinassa tehdyn tapaustutkimuksen (Lu et al. 2020) mukaan kesän kuumuus aiheuttaa myös lämpötilakuorman siltakannelle. Suurin lämpötilakuormitus syntyy auringon suorasta säteilystä. Kuvassa 19 on havainnollistettu kuinka sillan pintarakenteet (katkoviivalla) pääsevät nousemaan korkeisiin lämpötiloihin, vaikka ilman lämpötila pysyy paljon matalampana (musta yhtenäinen viiva). (Lu et al. 2020, s.3, 9)



*Kuva 19. Lämpötilavertailut sillan pintarakenteen ja ilman lämpötilan välillä (mukaillen Lu et al. 2020, s.3).*

### 3.2.1 Vesihöyryn paineen vaikutus

Suomalaisissa tutkimustuloksissa kuplimisilmiön keskeisimpänä syynä on pidetty betonin kosteuden ja kesäpäivien kuumuuden myötä syntyvää vesihöyryn painetta, joka muodostuu lämpötilarasituksen vuoksi eristyksen alle. Laukkasen ym. (1998, s.85) tutkimuksessa todettiin, että laskennallisesti vesihöyry voi muodostaa 50 °C lämpötilassa 0.03 MPa ylipaineen, joka on riittävä nostamaan irti alustastaan olevan pintarakenteen kuplalle. (Laukkanen ym. 1998, s.42-43, 85).

Pakanen (2014) on tehnyt opinnäytetyönsä sillan vedeneristyksen menetelmäselostuksesta. Työssään hän toteaa vesihöyryn olevan suurin yksittäinen tekijä, joka voi pilata vedeneristyksen onnistumisen. Pakasen (2014, s.8) mukaan betonin huokosissa oleva höyrynpaine pääsee purkaantumaan epoksitiivistyksen läpi aiheuttaen kuplan irronneessa kermässä ja asfaltissa. Työ käsitteli teräsbetonisiltojen kermieristystä ja epoksitiivistystä ja sen tarkoituksena oli lisätä työnohtajien valmiutta eristystöiden suorittamiseen suurilla ja pienillä työmailla (Pakanen 2014, s.7).

Julku (2016, s.16) toteaa myös tutkimuksensa lähtökohdaksi vesihöyryn olevan syy haitalliseen kuplimisilmiöön, johon vaikuttavat muun muassa epoksitiivistyksen epäjatkuvuuskohtat ja vedeneristeen heikko tartunta alustaansa. Julkun (2016) työ käsittelee betonisen siltakannen epoksitiivistyksen laadunhallintaa. Työn tavoitteena oli tutkia epoksitiivistystä, pintarakenteita ja kuplanmuodostumista vedeneristyskermin alle ja saada esille syitä epoksitiivistyksen epäjatkuvuuskohtien muodostumiselle. (Julku 2016, s.2, 16, 62)

### 3.2.2 Orgaanisten komponenttien lämpöhajoaminen vedeneristyksessä

Liian suurella lämpötilalla saadaan aikaan vahinkoa materiaaleille. Sarnowskin et al. (2014) tekemän tutkimuksen mukaan kumibitumikermiä kuumentaessa liikaa kermin ominaisuudet katoavat. Tutkimuksessa kuumennettiin kumibitumikermiä uunissa asteissa 200 °C, 250 °C ja 300 °C ja seurattiin, kuinka materiaali menettää ominaisuutensa vedeneristeenä. Kaasupolttimen liekki yltää 1000 °C lämpötiloihin ja paikallaan pidettynä kykenee tuhomaan paikallisesti kumibitumikermin rakenteen. (Sarnowski et al. 2014, s.327)

Vedeneristeen kuumentaminen ei ainoastaan heikennä vedeneristeen ominaisuuksia, vaan voi myös aiheuttaa pyrolyysin betonikannen ja vedeneristeen välissä (Chmielewska et al. 2018, s.115). Pyrolyysissä, eli kuivatuslauksessa kumibitumi kuumentuessaan aiheuttaa kemiallisen reaktion, jossa kaasuja alkaa muodostumaan hapettomaan tilaan. Kehittyneet kaasut koostuvat orgaanisista yhdisteistä, jotka vapautuvat lämpöasteiden 130 - 480 °C välillä. (Zhao 2012, s.547)

Orgaanisten komponenttien lämpöhajoaminen asennuksen aikana on tutkimusten mukaan nopea kuplimisen aiheuttaja, puhutaan myös kuumaprosessista. Kuplat ilmaantuvat nopeasti asennuksen jälkeen. Ilmiön tutkimisen vaikeus on se, että rakkuloita muodostuu nopeasti ja kaasun kehittyminen kestää joskus vain muutamman tunnin. Pääkaasu on vety, joka erittäin alhaisen molekyylimassan vuoksi "pakenee" helposti mistä tahansa säiliöstä, myös kuplasta. Kaasunäytteenottoon käytettävissä oleva aika on vain muutama päivä, jonka aikana tarvitaan päätös testien suorittamisesta. Testien suorittajalla tulee olla asianmukaiset varusteet, jolla voi kerätä ja testata kaasua. Itse kaasunäytteenottoprosessi on melko vaikea, koska kaasunäyte on erittäin helppo saastuttaa ilmalla. (Gajda et al. 2016, s.123)

Gajdan et al. (2016) tutkimuksessa todettiin, että kuplan sisällä oleva kaasua on syttyvää. Tutkimuksessa puristettiin vedeneristeessä olevaa kuplaa, jolloin kuplaan tehdyn reiän kautta kuplan kaasut pääsivät vapautumaan hallitusti palavaa paperia kohden ja kasvattivat liekkiä. (Gajda et al. 2016, s.121)

### **3.2.3 Kemialliset reaktiot betonipohjan epäorgaanisten yhdisteiden välillä**

Betonirakenteen nopea lämpötilan nousu, johtuen esimerkiksi kuumista kesäpäivistä tai kuumien päällystekerrosten rakentamisesta siltakannelle, on vaikuttanut kuplan syntymiseen vedeneristeen alle. Tutkimuksissa tästä ilmiöstä puhutaan kylmäprosessina kuplan muodostumiselle. Kylmäprosessi olettaa, että kemiallinen reaktio etenee betonikannen saavuttamassa lämpötilassa. Vapaiden metallien, kuten alumiinien ja piin reaktiot sementissä ovat todennäköisimmät reaktion aiheuttajat. (Chmielewska et al. 2018, s.103)

Piini (Si) ja veden tai kalsiumhydroksidin väliset reaktiot aiheuttavat eksotermisen reaktion. Tutkimukset osoittavat, että piinin reaktionopeus emäksisessä vedessä kasvaa

merkittävästi lämpötilan noustessa lämpötilan arvoon 35 °C ja lämpötilan noustessa arvojen 50 - 60 °C välille kaasun kehitymisnopeus on korkea. (Chmielewska et al. 2018, s.104)

Tehdyt havainnot osoittavat, että kuplien muodostumisen syynä ovat pienet metallien sulkeumat betonirakenteessa. Tutkimuksessa löydettiin jyrystystä betoninäytteestä metallihiukkasia. Kaikki metallisulkeumat eivät kuitenkaan reagoi betonin sisältämän veden kanssa, vaikka sirpaloitunut metallipöly on erittäin reaktiivista. Metallisulkeutumien reaktion käynnistämiseksi veden kanssa on välttämätöntä nostaa äkillisesti ympäristön lämpötilaa ja myös jonkin verran katalyyttiä, jota tutkimuksissa ei olla vielä selvitetty. Tämä katalyytti on luultavasti lisäaine, joka voi esiintyä satunnaisesti joissakin sementin osissa. (Gajda et al. 2016, s.123)

Gajda et al. (2016, s.120) tekemän tutkimuksen mukaan kuplien sisältämä kaasu sisälsi typen lisäksi vetyä noin 40 %, hiilidioksidia ja hiilivetyjä, kuten etaania, eteeniä ja propaania. Happea kaasussa ei todettu kuin nolasta muutama prosentteihin. Tapaustutkimuksen kaasukoostumus oli linjassa muihin vastaaviin tutkimuksiin, joissa on tutkittu kuplien kaasukoostumusta. (Gajda et al. 2016, s.120)

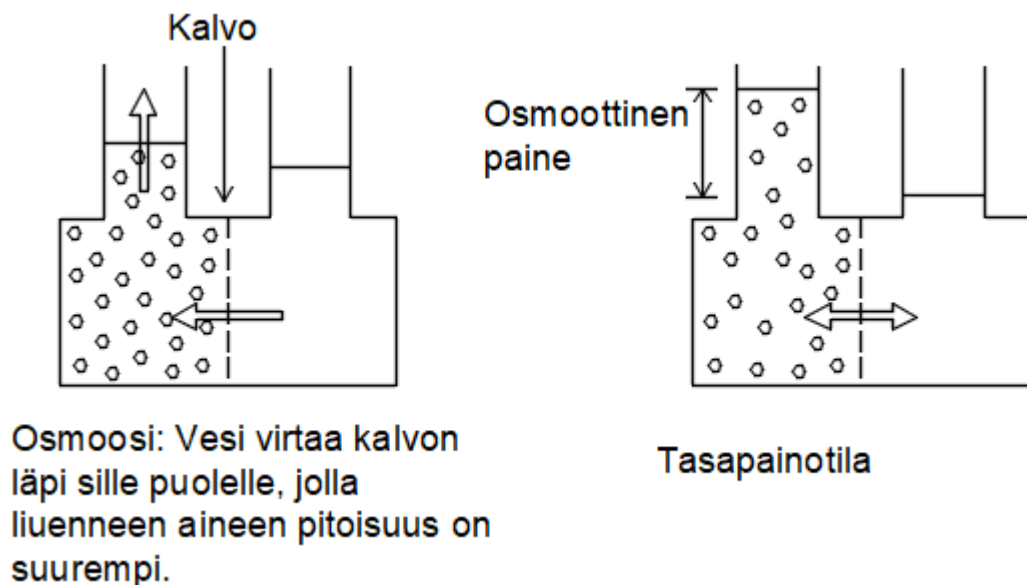
Vety- ja happipitoisuus näytteissä voi viitata siihen, että kuplassa oleva kaasu on vapautunut betonin huokosista. Alhainen happipitoisuus voi viitata siihen, että se kului hapetus-pelkistysreaktiossa. Vedyn määrä (noin 10 %) kerätyissä näytteissä voi viitata hapetus-pelkistysreaktion etenemiseen. Isokoorisissa olosuhteissa, eli tilavuuden pysyessä vakiona, pienenkin kaasumäärän lämmittäminen voi johtaa suureen paineen nousuun, mikä puolestaan voi aiheuttaa kuplia. (Gajda et al. 2016, s.121)

Myös Laukkanen ym. (1998, s.77) olivat tutkimuksessaan analysoineet kuplien sisältämän kaasun koostumusta. Tutkimuksessa todettiin kuplien kaasuseoksen sisältävän suurimmaksi osaksi vesihöyryä. Kuitenkaan heillä ei ollut varmuutta mitä kaasuja kuplissa oli silloin, kun kuplat ensi kertaa nostivat kermin irti alustastaan.

### 3.3 Osmoosin vaikutus kuplimiseen

Osmoosin olemassaolo siltarakenteissa on tiedostettu jo vuosikymmeniä. Laukkanen ym. mainitsee omassa kirjallisuusselvityksessään (1998, s.85), että kansainvälisesti osmoottiset paineet betonissa ovat tiedostettuja kermieristyksen kuplimisen syitä. Kuitenkin Laukkanen on todennut omassa tutkimuksessaan, että rakenteessa tulisi olla pinnoitteena puoliläpäisevä kalvo, jotta osmoosi voisi tapahtua vedeneristeen alla (Laukkanen ym. 1998, s.41). Suomalaiset tutkimukset eivät ota kantaa osmoosin olemassaoloon siltakansien kuplimisen syynä.

Osmoosiprosessissa vesi virtaa puoliläpäisevän kalvon poikki liuksesta, jossa on alhaisempi liuenteen aineen pitoisuus liukseen, jossa on korkea liuenteen aineen pitoisuus. Tilanne kehittyi, kun kaksi liusta erottava kalvo on hieman vettä läpäisevä, mutta liuenteita aineita läpäisemätön. Näin vesi virtaa kalvon poikki tasapainottaakseen liuenteiden aineiden pitoisuuksia kalvon kummallakin puolella. Kuva 19 osoittaa, kuinka paine muodostuu siltakannen vedeneristeen alle. (Henderson et al. 2020, s.179)



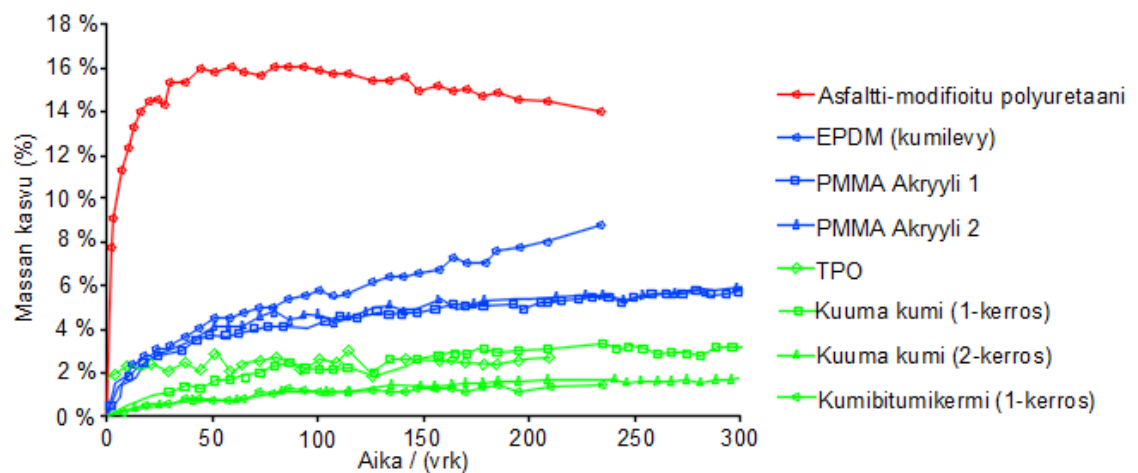
Kuva 19. Osmoosiprosessi (mukailten Henderson et al. 2020, s.179).



### 3.3.1 Vedeneristeiden osmoottinen virtaus

On huomattu, että tietyt vedeneristyskalvot päästävät vettä lävitseen osmoottisella virtauksella (osmotic flow) ja voivat aiheuttaa pitkällä ajanjaksolla ongelmia rakenteelle. Henderson et al. (2020, s.177) ovat tehneet tutkimuksen erilaisten vedeneristeiden riskialttiudesta osmoosille. Vaikka tutkimuksen mukaan kumibitumikermit (SBS) eivät ole riskivedeneristeiden listalla, on se otettu tutkimuksessa vertaisvedeneristeenä huomioon muiden tutkittavien vedeneristeiden rinnalle. (Henderson et al. 2020, s.177-178)

Hendersonin et al. tutkimuksessa (2020, s.177-187) tutkittiin osmoottista virtausta yleisimmille käytössä oleville vedeneristeille. Tutkimuksessa tutkittiin kalvon paksuuden, materiaalin höyryn läpäisevyyden ja ikääntyneen materiaalin vaikutusta osmoottiseen virtaukseen. Tutkimusasteikkona käytettiin  $\text{g/m}^2/\text{vrk}$ , joka tarkoittaa vedeneristeen vesimäärää, joka pääsee neliömetrin kokoisesta alueesta läpi vuorokauden aikana. Osmoottisen virtauksen korkeaan riskiryhmään (high-risk) kuuluivat ne vedeneristeet, joiden osmoottinen virtaus oli välillä 5 - 20  $\text{g/m}^2/\text{vrk}$ . Riskiryhmän statuksen saivat kylmäsovelletut järjestelmät, kuten asfalttimodifioidut polyuretaanit ja asfalttiemulsiot tai muut puoliläpäisevät materiaalit. Keskitason riskiryhmän (medium-risk) osmoottinen virtaus oli välillä 2 - 4  $\text{g/m}^2/\text{vrk}$ , ja johon kuuluivat uudet asfalttimodifioidut polyuretaanit ja polyureat. Matalan riskin (low-risk) materiaalit päästivät 0 - 1  $\text{g/m}^2/\text{vrk}$  vettä lävitseen, eikä materiaaleilla ole tiedetty esiintyvän osmoottisia rakkuloita. Näitä olivat esimerkiksi kuumakumi (hot rubber) ja kumibitumikermit. (Henderson et al. 2020, s.185-186)

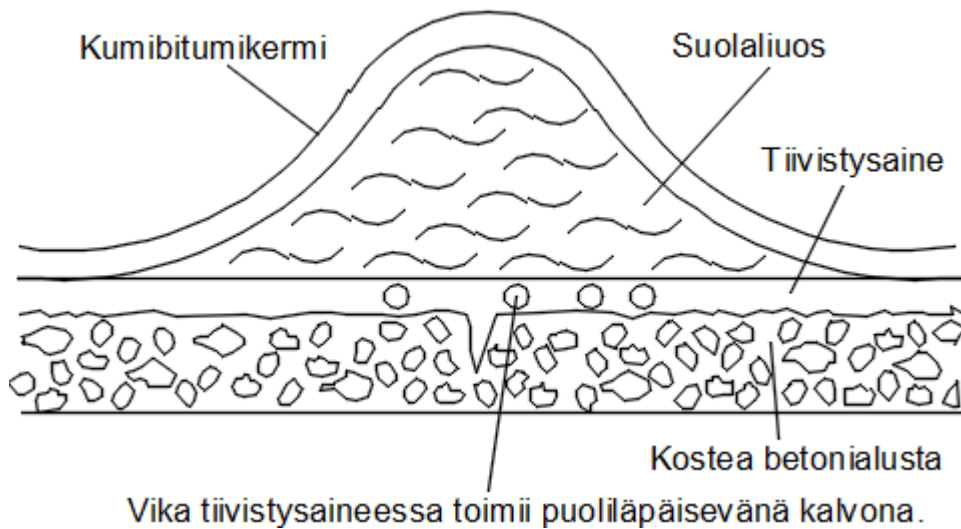


Kuva 20. Absortiotutkimus vedeneristeille (mukailten Henderson et al. 2020, s.190).

Vedeneristeiden osmoottisen virtauksen määrittämisen yhteydessä tehtiin myös vedeneristeiden massan kasvun tutkimus absorptiomittauksena. Tutkimuksessa tutkittiin vedeneristeiden massan kasvua ja todettiin, että osmoottiselle virtaukselle eri riskiryhmien materiaalit imivät vettä itseensä samassa suhteessa omaan riskiryhmäänsä nähden. Kuvassa 20 on esitetty punaisella korkean riskiryhmän vedeneristeet, sinisellä keskitasoisen riskiryhmän materiaalit ja vihreällä matalan riskiryhmän materiaalit. Esimerkiksi kumibitumikermin (SBS) massa kasvoi noin 1.5 % ensimmäisen 200 päivän aikana. (Henderson et al. 2020, s.190)

### 3.3.2 Osmoosi epoksinnoitetussa betonirakenteessa

Belgiassa Ignoul et al. (2004) ovat suorittaneet tapaustutkimuksen epoksinnoitettujen betonilattian kuplimisesta. He määrittelevät pinnoituksen irtoamiseen vaadittavan paineen olevan 1.5 MPa. Tämän oletuksen perusteella he sulkevat hydrostaattisen (0.1 MPa) ja kapillaarisen (0.2 MPa) paineen sulkeutuvan pois kuplimisen aiheuttajina. Jäljelle jää osmoottinen paine, joka voi saavuttaa jopa yli 2.5 MPa paineen. (Ignoul et al. 2004, s.2)



Kuva 21. Osmoottinen prosessi (mukailten Ignoul et al. 2004, s.3).

Osmoosissa luokset yrittävät saavuttaa tasapainon puoliläpäisevän kalvon poikki. Vesi virtaa laimeammasta luoksesta väkevämpään luokseen, kun luokset ovat erotettu puoliläpäisevällä kalvolla. Kuvassa 21 kerrotaan epoksikerroksen epäjatkuvuuskohdan toimivan puoliläpäisevänä kalvona. Betonilaatan sidosrajapinta tai betonin uloin yläkerros voivat toimia myös osmoosin puoliläpäisevänä kalvona ja kerryttää vesikuplan muovaantuvan pintamateriaalin alle. Portlandin sementissä on luonnossa esiintyvää liukoista suolaa, joka voi itsessään toimia osmoottisen rakkulan muodostumisen katalysaattorina. (Ignoul et al. 2004, s.2-3)

Tutkimuksen teoriaosuudessa todettiin, että betoni voi sisältää jopa 5 massaprosenttia vapaata vettä, joka riittäisi aloittamaan osmoottisen kuplaprosessin. Ulkopuolisen veden määrää tulisi rajoittaa, jotta ongelma ei lisääntyisi. Ulkopuoliset kosteudenlähteet voivat olla esimerkiksi pohjavesi, viemärit, puhdistusprosessista jäänyt vesi tai kondensaatio. (Ignoul et al. 2004, s.3)

Ignoulin et al. (2004) tapaustutkimuksen mukaan tehdashallin lattian kuplimisen pääasiallisena syynä oli osmoosi. Epoksin kiinnittyminen betonin pintaan ei ollut onnistunut, todennäköisesti liian alhaisen asennuslämpötilan vuoksi, ja tällöin epoksissa olleet viat aiheuttivat betonin pintaan puoliläpäisevän kalvon. Kuplista löytyi mäntyöljyä

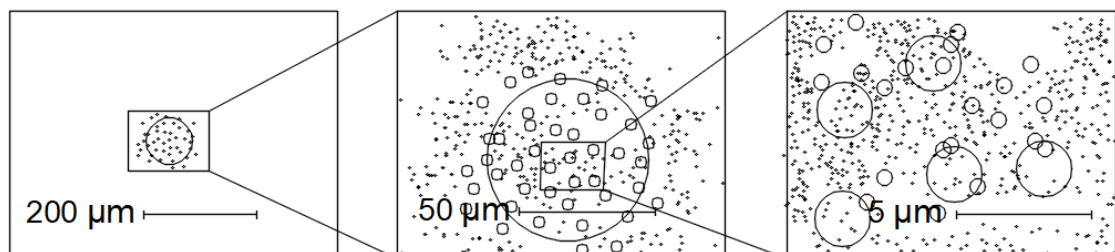
ja fenolia, jotka ovat todennäköisesti toimineet konsentraatioeron mahdollistavina aineina. (Ignoul et al. 2004, s.7)

Kuitenkaan osmoosin olemassaoloa ei ole tunnustettu tutkimusyhteisössä ja aiheesta on tehty tutkimuksia puolesta ja vastaan. Saksan Aachenin yliopiston rakennustutkimuksen instituutissa (Wolff et al. 2007) tehdyn tutkimuksen mukaan osmoottiset prosessit voidaan sulkea pois kuplimisen aiheuttajana olettaen, että epoksissa ei ilmene perustavanlaatuisia vikoja. Tutkimuksessa otettiin myös kantaa betonin ja pohjamaalin väliseen kosketusvyöhykkeeseen, joka läpäisee heidän tutkimuksensa mukaan kuplanesteisiin kuuluvia komponentteja. Tällä perusteella betonin rajapinta ei voi toimia puoliläpäisevänä kalvona. (Wolff et al. 2007, s.440)

### 3.4 Epoksinnoitteisten teräsbetonisten siltakansien kupliminen

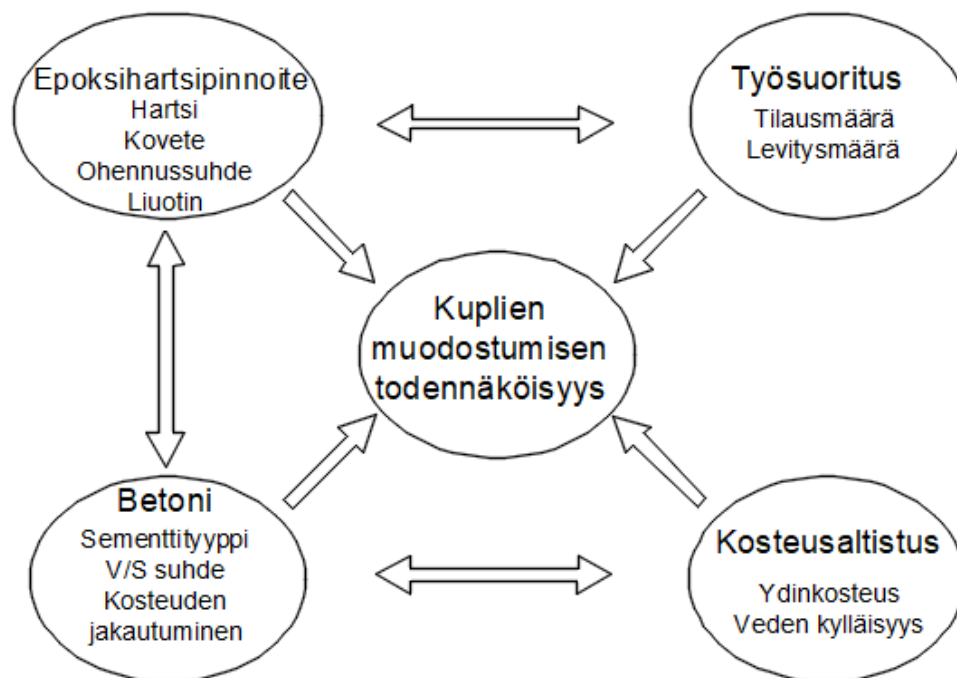
Saksassa Aachenin yliopistossa tehdyn tutkimuksen (Wolff et al. 2007) mukaan epoksinnoitteisten betonirakenteiden kuplimisongelmat johtuvat epoksin paikallisista kiinnittymisongelmista. Kiinnittymisongelmat voivat johtua betonin kosteudesta, joka huonontaa epoksin mekaanisia ominaisuuksia. (Wolff et al. 2007, s.440, 448-449)

Tutkimuksen keskeiset havainnot olivat, että betonissa on vesipitoisuudesta ja lämpötilasta riippuen pysyviä paineita luokkaa 0.2 - 0.3 MPa ja paikallisten tiivistysaineen tartuntahäiriöiden vuoksi betonin olemassa olevat paineet riittävät itsessään kuplan muodostumiseen. Kuvassa 22 on kuvattu epoksinnoitteen paikallinen kiinnittymisen ongelma. (Wolff et al. 2007, s.440, 445)



Kuva 22. Epoksinnoitteessa paikallinen kiinnittymisen ongelma (mukaillen Wolff et al. 2007, s.445).

Tutkimuksen tärkeimmät kuplien muodostumiseen vaikuttavat tekijät ja niiden keskinäiset vuorovaikutukset on tiivistetty kuvassa 23. Kuvan keskellä on kuplan muodostumisen todennäköisyys. Epoksinnoitteeseen kuuluvat hartsi, kovete, reaktiivinen laimennusaine ja liuotin. Epoksinnoite vaikuttaa betonin ja toteutuksen kanssa. Toteutukseen kuuluvat tilausmäärä ja levittäminen. Betoniin kuuluvat sementtityyppi, vesi/sementtisuhte ja kosteuden jakautuminen. Betoni vaikuttaa myös kosteusaltistukseen, johon kuuluvat ytimen kosteus ja kylläisyysaste. Jokainen pääkohta vaikuttaa kuplimisen todennäköisyyteen ja osa pääkohdista vaikuttaa toinen toisiinsa. (Wolff et al. 2007, s.440)



Kuva 23. Epoksinnoitetun betonirakenteen kuplimisen syyt ja niiden keskinäiset vuorovaikutukset (mukaillen Wolff et al. 2007, s.440).

Epoksin tartuntalujuuden ollessa paikallisen kiinnittymisongelman vuoksi vain 10 % oletetusta, kupla voi syntyä betonissa olevien sisäisten paineiden myötä. Pääsyyksi kuplan muodostumiseen Aachenin yliopistossa tehty tutkimus olettaa kosteuden aiheuttamat kapillaaripaineet, jotka pääsevät muodostamaan vesikuplan kapillaarisen paineen myötä. (Wolff et al. 2007, s.442)

Siltakansien eristysalustaan kohdistuu myös paikallisia vetojämnityksiä, jotka pyritään hallitsemaan vetoterästen avulla. Varsinkin tukien kohdat ja reunaulokkeiden linjat kannen yläpinnassa halkeilevat kutistuman ja vetojämnityksen yhteisvaikutuksen vuoksi. Halkeamat aiheuttavat epoksinnoitteiseen eristysalustaan epäjatkuvuuskohtia, joiden kautta kosteus pääsee vedeneristyskermin alle muodostamaan vesihöyrynpainetta. Paineen ollessa kyllin suuri pintarakenteeseen muodostuu kupla.

### **3.5 Työvirheet ja väärät toimintatavat**

Suomalaiset tutkimustulokset ovat kautta linjan ottaneet huomioon työvirheiden ja väärin toimintatapojen olemassaolon vedeneristysten ongelmien syynä. Laukkanen ym. (1998) tutkimuksessaan luettelee useita työvirheitä ja vääriä toimintatapoja kuplimisen syiksi. Materiaalin pilaaminen kuumentamalla osoittautui varmaksi kuplimisen aiheuttajaksi, koska vedeneristeen ominaisuudet eivät olleet enää toimivia. Myös materiaalien, kuten tiivistysaineiden väärät käsittelytavat aiheuttivat ongelmia vedeneristysten lopputulokselle. (Laukkanen ym. 1998, s.88-89)

Sääsuojien puutteellisuudet heikentävät huomattavasti eristyksen laatua. Sääsuojan puuttuminen tai vesivuodot aiheuttivat kosteusrasitusta eristysalustalle. Kuvassa 24 näkyy, kuinka sadevesi on päässyt huonon sääsuojan läpi eristysalustalle. Myös talvella tehdyt eristystyöt aiheuttavat laaturiskejä vedeneristykselle. Huonoihin eristysolosuhteisiin lukeutuvat myös kastelämpötilan läheisyys, liika kuumuus ja viileys. (Laukkanen ym. 1998, s.88-89)



*Kuva 24. Sääsuoja on päästänyt sadeveden siltakannelle (Saarinen & Vuorikoski, 2021).*

Myös Puolassa (Chmielewska et al. 2018, s.113) on listannut yleisimmät työvirheet:

- eristeen kiinnittäminen pohjustamattomalle tai riittämättömästi pohjustetulle alustalle
- eristeen kiinnittäminen kostealle alustalle
- eristeen liimaaminen kuivumattomaan tiivistysaineeseen
- eristeen liimaaminen likaiseen tai pölyiseen alustaan
- eristeen riittämätön liimaus alustaan
- ilmakuplan sulkeminen eristeen alle liitoskohdissa tai pystypintojen eristeen ylityksen läheisyydessä
- eristekermien väärä liimaus, jolloin vesi pääsee kulkemaan eristelevyn alle

Sillan korjausohjeissa (SILKO 2021) on ohje vedeneristyksen alustan kunnostuksesta. Ohje on tarkoitettu korjaustoimille, kun siltakannen vedeneriste ei enää toimi ja kannen yläpintaan alkaa muodostua vaurioita. Vedeneristeen toimimattomuus johtuu käyttöiän

loppumisesta, suunnittelu- tai työvirheistä. Yleisimpiä syitä korjaustoimille ovat eristysalustan epäkelpoisuus.

Liian kostea eristysalusta aiheuttaa suuren höyrynpaineen vedeneristeen alle, minkä seurauksena vedeneristyksessä mahdollisesti olevaan heikkoon tai puutteelliseen kohtaan kehittyy kupla ja pintarakenteet vaurioituvat. Liian korkea kosteuspitoisuus saattaa aiheuttaa myös reikien muodostumista tiivistysaineeseen sen kuivumisen aikana ja aiheuttaa siten epäjatkuvuuskohtien kautta painetta vedeneristeen alle. (SILKO 2021; Vuorikoski 2022)

Epätasainen eristysalusta altistaa vedeneristeen rikkoontumiselle joko eristystyön tai käytön aikaisten kuormien vaikutuksesta. Kansilaatan yläpinnan halkeilut aiheuttavat kuplimista ja muita vaurioita. Pintarakenteet vaurioituvat vedeneristyksen huonon tartunnan vuoksi. Kansilaatan viettokaltevuuden puuttuminen aiheuttaa pintarakenteiden pakkasrapautumista. Kloridien suuri määrä ruostuttaa teräkset, mikä aiheuttaa betonin rapautumista. (SILKO 2021)

Kaksinkertainen kumibitumikermieristys valitaan silloin, kun halutaan vedeneristeeille mahdollisimman pitkä käyttöikä. Vaatimukset täyttävälle betonialustalle tehdyille kermieristykselle arvioitu käyttöikä on 40 vuotta. (Väyläviraston ohjeita 4/2019, s.35) Työvirheet ja väärät toimintatavat vähentävät käyttöikää huomattavasti ja siltakansien pintarakenteiden korjauksia joudutaan tekemään näiden vuoksi vaikka teoreettista käyttöikää vedeneristeeillä olisikin jäljellä.

Väylävirasto on edellyttänyt omissa kohteissaan jo useamman vuoden, että vedeneristyksen tekijöillä ja valvojilla tulee olla voimassa oleva siltojen ja muiden liikennöityjen alueiden vedeneristäjän sertifiikaatti. Sertifiikaatin saamisen edellytyksenä tulee käydä kaksipäiväinen koulutus, jossa perehdytään kermien ohella vedeneristyksessä käytettäviin muihin tuotteisiin, kuten tiivistysaineisiin, mastiksiin ja nestemäisiin vedeneristeisiin. Koulutuksen jälkeen vedeneristäjä tuntee erilaiset tuotteet ja niiden ominaisuudet, asennustavat ja -olosuhteet, alustan laatuvaatimukset ja laadunvalvontamittaukset. Koulutuksessa opastetaan myös oikeaoppisen sääsuojan hankkimiseen ja yhdenmukaistetaan kaikkien vedeneristäjien käsitystä vedeneristystyöstä. (Eurofins Expert Services Oy 2022)



## 4 TULOSTEN TARKASTELU

Sillan kannen kupliminen on ilmiönä kansainvälisesti laajasti tunnettu. Ilmiöstä on tehty useita tutkimuksia, jotta ymmärrettäisiin paremmin kuplimisen aiheuttajan ja löydetäisiin ratkaisuja kuplimisen estämiseksi. Suomalaisen kuplimisongelman tutkimuslähtökohdat perustuvat pitkälti Laukkasen ym. (1998) tekemään tutkimukseen kuplimisen estämisestä, missä tutkimuksen lopputuloksena kuplimisen lähtökohtana olivat liiallinen kosteus, huokoisuus ja työvirheet.

Kotimaiset sekä kansainväliset tutkimukset osoittavat, että lämpötilalla on oleellinen myötävaikutus siltakannen kuplimiseen (vertaa Laukkanen ym. 1998; Chmielewska et al. 2018; Gajda et al. 2016). Vedeneristeen ja pintarakenteiden asentaminen sekä auringon säteily aiheuttavat lämpökuorman materiaaleille ja betonirakenteelle. Lämpötilakuormien vuoksi betonissa oleva kosteus höyrystyy ja pääsee purkautumaan vedeneristeen alle. Kumibitumikermin tartuntalujuus vähenee lineaarisesti lämpötilan noustessa ja vastaavasti höyrönpaine kasvaa lämpötilan noustessa. Kuplan syntymekanismin tutkimus on antanut tutkimustietoa kuplan syntymiseen tarvittavista voimista. Useassa tutkimuksessa on todettu, että höyrönpaine pystyy muodostamaan kuumetessaan 0.03 - 0.045 MPa paineen, joka riittää nostamaan kuumenneen ja ominaisuuksiltaan heikentyneen vedeneristyskermin kuplalle. Termodynaamiset ja sykliset kuormitukset lisäävät syntyneen kuplan kasvua murtumismekaniikan lakien mukaisesti.

Vesihöyrönpaineen aiheuttamaa kuplimista on pyritty ehkäisemään (50 mm) suojabetonikerroksella, joka on laskennallisesti luonut 0.002 MPa vastapaineen höyrönpaineelle vedeneristyksen päällä (Laukkanen 1998, s.43). Syntyvä vastapaine on viidestoistaosa kuplan muodostumiseen tarvittavaan paineeseen verrattuna. Suojabetoniin kuitenkin kuuluu teräksinen verkko tai vaihtoehtoisesti teräskuitua, jotka lisäävät suojabetonin vetolujuutta. Vetolujuuden kasvattamisen myötä suojabetoni pystyy hillitsemään kuplan muodostumista. Suojabetoni on myös suojanut vedeneristyskermiä ja siltakannen yläpintaa suurilta lämpötilakuormilta ja siten kermin tartuntalujuus alustaan on pysynyt riittävän hyvänä.

Eristysalustan tiivistyskäsittelyllä on pyritty luomaan vesihöyryä läpäisemätön pinta betonin yläpintaan, jotta höyrönpaine ei pääsisi kohdistumaan vedeneristykseen.

Kuitenkin on huomattu tiivistyspinnoitteessa kutistumahalkeiluista ja työvirheistä johtuvia epäjatkuvuuskohtia, joiden vuoksi höyrynpaine pääsee kulkeutumaan paikallisesti vedeneristeen alle. Vedeneristyksen laatua on pyritty kehittämään erilaisin tutkimuksien, koulutuksien ja ohjeistuksien kautta.

Uusimmissa kansainvälisissä tutkimuksissa (vertaa Gajda et al. 2016; Chmielewska et al. 2018) lämpötilan nousuun on yhdistetty myös kemiallisia reaktioita, jotka aiheuttavat kuplimista. Kemiaaliset reaktiot ovat jaettu kahteen eri kategoriaan: kuuma- ja kylmäprosessiin kaasun syntyprosessin mukaan. Kuumaprozessissa kumibitumin liika kuumentaminen aiheuttaa bitumin orgaanisten aineiden hajoamisen, jolloin kaasua alkaa muodostumaan vedeneristeen alle. Kylmäprozessissa betonirakenteen äkillinen kuumentaminen aiheuttaa eksotermisen reaktion, jossa vapaiden metallien kemiallinen reaktio vapauttaa kaasua vedeneristeen alle. Näiden kemiallisten prosessien aiheuttaman kuplan kaasukoostumuksessa yleisin alkuaine typen lisäksi on vety. Lisäksi on havaittu hiilidioksidia, etaania, eteeniä ja propaania. Happea kemiallisen reaktion aiheuttamissa kaasuisissa on todettu vain nollasta muutamaa prosentteihin. Kaasukoostumuksen analysointi tulisi suorittaa nopeasti kuplan muodostumisen jälkeen, koska tutkimusten mukaan vety karkaa kuplasta muutamassa vuorokaudessa. Alustastaan irronnut vedeneriste toimii jatkossa vesihöyrynpaineen kerääntymispaikkana.

Kuuma- ja kylmäprozessien olemassaoloa ei olla vielä tutkittu suomalaisessa ympäristössä. Kuumaprozessin lähtökohtana ovat suuret lämpötilat, jotka johtuvat kermien hitsauksessa käytettävistä nestekaasupolttimista. Kuumuuden vaikutukset tiedostetaan suomalaisessa kermien asennuskulttuurissa. Kermien asennusvirheistä yksi onkin liian vähäinen kermien lämmittäminen kermien kiinnihitsauksen aikana. Siltakansien kermieristyksien yleistyneeksi toimintatavaksi onkin tästä syystä muodostunut molempien kermien liimaaminen kumibitumilla.

Kylmäprozessia tulisi tutkia enemmän varsinkin suomalaisilla betonilaaduilla. Kuinka todennäköisiä ovat betonissa tapahtuvat kemialliset reaktiot vuosien päästä valamisestä? Tutkimukset eivät ottaneet kantaa kaasun paineiden suuruusluokkaan kemiallisten reaktioiden seurauksena.

Osmoottisen paineen vaikutus siltojen kuplimiseen on edelleenkin ristiriitainen tutkijoiden keskuudessa. Muodostuessaan osmoosi voi saavuttaa jopa 2.5 MPa paineen, joka riittäisi nostamaan pintarakenteen kuplalle. Vedeneristeiden osmoottista virtausta ylhäältä päin oli tutkittu ja todettu, ettei kumibitumikermin läpi tapahdu osmoosia. Vedeneristeen alle betonirakenteesta osmoottisesti siirtyvä vesi johtuu tutkimusten mukaan vain virheellisten toimintatapojen tai työvirheiden myötävaikutuksesta. Betonirakenteesta tuleva mahdollinen osmoottinen virtaus voidaan estää kuivattamalla eristysalusta ylimääräisestä sitoutumattomasta vedestä eristysalustan kosteusvaatimukseen.

Työvirheiden osuus kuplimisessa oli ilmeinen useiden tutkimusten mukaan. Materiaalien väärät käsittelytavat aiheuttivat materiaaliominaisuuksien heikkenemistä ja työmaiden erimielisyydet toimintatavoista johtivat usein huonoihin ratkaisuihin vedeneristykselle. Nykyisin siltakansien vedeneristäjillä ja valvojilla tulee olla voimassa oleva sertifikaatti, jotta he voivat suorittaa vedeneristystyön. Sertifikaatin saamisen ehtona on kaksipäiväinen koulutus, lopputentin läpäiseminen ja vedeneristykseen asentajilta vaadittava näyttötyö. Koulutuksen tarkoituksena on yhdenmukaistaa vedeneristäjien käsitystä ja vaatimustasoa vedeneristystyöstä.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Pintarakenteiden kuplimisen syy on usein tapauskohtainen. Tutkimukset eivät ole vielä päätyneet yhteen tiettyyn syyhyn, joka aiheuttaa kuplimisen siltakannen pintarakenteissa. Syyn yleisimmin oletetaan olevan kuumuuden myötävaikutuksesta syntyvän paineen tai työvirheiden aiheuttama. Jokaista kuplimista tulisikin tutkia tarkemmin heti kuplan ilmaantumisen jälkeen, jotta syy voitaisiin varmuudella todeta. Asiantuntijat ovat lähes varmoja siitä, että jokaisesta kuplanavauksesta löytyy selittävä tekijä kuplan muodostumiselle.

Kuumuuden on arveltu olevan suurin myötävaikuttaja kaasun paineen muodostumiselle vedeneristeen alle, minkä vuoksi lämmennyt ja tartuntaominaisuuksiltaan heikentynyt kumibitumikermi repeytyy irti alustastaan. Kun vedeneristeen irronnut alue täyttyy riittävällä kaasunpaineella, pintarakenteeseen muodostuu kupla. Kansainvälisissä tutkimuksissa on havaittu, että kyseisen kuplan muodostumisen syy voi olla lähtöisin vesihöyryn ohella myös kuumuudessa syntyvän kemiallisen reaktion aiheuttamasta kaasunpaineesta. Suuren lämpötilakuorman vähentäminen siltakannen yläpinnasta voisi vähentää haitallista kuplimisongelmaa. Toistaiseksi kuumuuden estämisestä ei olla tehty tarkempaa tieteellistä tutkimusta todennäköisesti ratkaisujen huonojen kustannustehokkuuksien vuoksi.

Ratkaisua kuplimisongelmaan on haettu muun muassa kaasun paineita vähentämällä. Vesihöyrystä johtuvien paineiden vähentämiseksi on tärkeää huomioida riittävä siltakannen kuivattaminen ylimääräisestä sitoutumattomasta vedestä. Veden kuivattaminen poistaa myös mahdollisen osmoosin esiintymisen siltakannessa. Kannen kuivattaminen sallittuihin kosteusvaatimuksiin vähentää myös ongelmaa tiivistysaineen kiinnittymisessä.

Kemiallisen eksotermisen reaktion olemassaoloa tulisi tutkia suomalaisessa betonirakenteessa enemmän. Esiintyykö eksotermiseen reaktioon liittyviä vapaita metalleja suomalaisessa maaperässä tai betonin lisäaineissa ja ovatko kylmäprosessin kemiallisen reaktion muodostavat paineet kuinka suuria sekä kykeneekö paine muodostamaan kuplan pintarakenteeseen, olisivat tutkimisen arvoisia kysymyksiä.

Tiivistyskäsittelyllä tehdään eristysalustaan vahva kalvo, joka estää betonirakenteessa syntyvien kaasujen tunkeutumisen vedeneristyskerroksen alle. Onnistunut tiivistyskäsittely ei päästä vesihöyryä tai kylmäprosessin muodostamaa kaasua lävitseen ja pintarakenteet ovat turvassa haitalliselta kuplimiselta. Tämän lisäksi tiivistysainekäsittelyn tehtävä on suojata siltakannen betonirakennetta suolarasitukselta. Asiantuntijoiden mukaan oikeaoppinen tiivistysaineen asentaminen riittävän hyvälle eristysalustalle estää kuplien muodostumisen. Kuitenkin betonirakenteet kutistumishalkeilevat vedetyiltä kohdilta vielä vuodenkin jälkeen valamisesta, joten tiivistysaineen epäjatkuvuuskohtia on lähes mahdotonta välttää. Tämän vuoksi eristysalustan kosteusvaatimuksiin tulisi kiinnittää erityistä tarkkuutta varsinkin siltakannen yläpinnan vedetyillä alueilla, jotta höyrynpaineet eivät pääsisi muodostumaan liian suuriksi.

Suojabetonin tarkoituksena on vähentää vedeneristeen lämpötilakuormaa ja antaa vastapainetta kuplan muodostumista vastaan. Suojabetoniin asennetaan teräsverkko tai vaihtoehtoisesti teräskuitua, joka antaa suojabetonille riittävän vetolujuuden kuplan muodostumista vastaan. Ominaisuuksien vuoksi suojabetoni toimii laattana ja vastustaa kuplan muodostumista ja eristeen irtoamista alustastaan. Asiantuntijoiden mukaan suojabetonin asentamiselle laatuvaatimukset eivät ole riittävät ja ongelmia on havaittu esimerkiksi kosteuden vuoksi. Ohjeellisena suosituksena suojabetonin tekemiselle on sääsuojan käyttäminen. Kyseisen suosituksen lisääminen vaatimukseksi voisi edistää suojabetonin laatua.

Väyläviraston ohjeita (4/2019) -ohjeen mukaan siltakansien pintarakenteiden vedeneristyskermien kiinnitystavaksi on lueteltu liimaus tai kuumentaminen. Kuplakohtien rakenneavauksissa on kuitenkin huomattu, että yksi yleisin kuplimisen syy on ollut kermin kiinnittymisen ongelma, joka johtuu usein liian vähäisestä kuumentamisesta. Kansainvälisesti suurena ongelmana on ollut kermien liiallinen kuumentaminen nestekaasupolttimilla, joka on tuhonnut kermin ominaisuuksia. Liian vähäisen ja liiallisen kuumentamisen ongelmat poistuvat, jos molemmat kermit liimattaisiin kumibitumiliuoksella.

Työvirheitä ja vääriä toimintatapoja tulee välttää, jotta ei lisätä kuplimisriskiä. Kosteudenhallintaan liittyvät työvirheet ovat tutkimusten mukaan työvirhekategoriasta

yleisimmät kuplimisenaiheuttajat, joten niihin tulee kiinnittää jatkossakin suurta huomiota. Rakennusteollisuuden koulutuskeskuksen (Rateko) vedeneristäjäkoulutukset pyrkivätkin toimimaan käytäntöjen yhtenäistämiseksi ja tiedon jakamisessa.

## 6 YHTEENVETO

Siltakansien vedeneristeen haitallinen kuplimisongelma aiheuttaa liikenteellisiä haittoja ja ylimääräisiä kustannuksia yhteiskunnalle. Kuplan muodostumisen syyllä ja sen estämiselle on esitetty monia erilaisia mielipiteitä, mutta kuitenkin toimivaa ratkaisua ei olla löydetty. Tämän diplomityön tavoitteena oli perehtyä siltojen vedeneristeen kuplimisongelmaan kotimaisten ja kansainvälisten tutkimusten kautta sekä pyrkiä löytämään uusia näkökulmia ja havaintoja kuplimisongelman ymmärtämiseksi. Työn tavoitteena oli myös kartoittaa mahdollisia jatkotutkimustarpeita löydettyjen näkökulmien ja havaintojen tueksi. Tutkimuksen kuplimisongelma rajattiin koskemaan vain teräsbetonisia siltakansia, joissa on kaksinkertainen kumibitumikermieristys. Kuplimisongelmaa on havaittu myös muillakin vedeneristysmateriaaleilla ja siltakansien materiaaleilla.

Kotimaisten tutkimusten mukaan siltakansien kuplimisongelmat johtuvat kosteudesta, huokoisuudesta ja työvirheistä. Tutkimukset ovat keskittyneet pitkälti kosteudenhallintaan ja vedeneristyksen laatutekijöiden parantamiseen. Kansainvälisistä tutkimuksista havaittiin, näiden edellä mainittujen tekijöiden lisäksi, kemiallisten prosessien olemassaolon vaikutus siltakansien kuplimiseen. Kuuma- ja kylmäprosessien kuplanmuodostumista pidettiin monessa kansainvälisessä tutkimuksessa oleellisena kuplanmuodostumisen syynä. Kemiallisten prosessien olemassaoloa tulisi tutkia enemmän suomalaisissa olosuhteissa ja materiaaleissa.

Tutkimuksen havaintojen perusteella avain siltakansien vedeneristeen onnistumiselle on laadukas ja huolellinen työjälki. Kaksinkertaisen kumibitumikermieristyksen käyttöikä on ohjeiden mukaan 40 vuotta, johon päästään ilman laadullisia ongelmia. Eristysalustan kosteusvaatimukseen kuivattaminen vähentää riskiä tiivistysaineen ja kermien kiinnittymisongelmille. Ylimääräisen sitoutumattoman veden kuivattaminen pois vähentää myös höyrynpainetta vedeneristeen alla ja poistaa mahdollisen osmoottisen virtauksen kehittymisen. Eristysalustan liiallinen huokoisuus ja karheus aiheuttavat tiivistysainekerrokseen epäjatkuvuuskohtia ja täten vaikeuttavat tiiviin yhtenäisen kalvon muodostamista. Kermien vetolujuuksien heikentymistä aiheuttavat tyypillisesti epäpuhtaudet kuten pöly, öljyt ja rasvat sekä liiallinen alustan pintakosteus tiivistysaineen

levittämisen aikana. Työvirheiden ja väärin toimintatapojen välttäminen on näiden lisäksi tärkein kopiointivirheiden estämisen keino.



## LÄHDELUETTELO

Chmielewska, B., Garbacz, A., Adamczewski, G., Rymsza, B. 2018. Thermal actions on the materials during deck and pavement construction. Archives of Civil Engineering, (vol) LXIV (4), s.101-118.

Eurofins Expert Services Oy 2022. Rakentamisen sertifikaatit – Siltojen ja muiden liikennöityjen alueiden vedeneristäjä (Siltojen vedeneristäjä). Saatavissa: [https://rakentamisesertifikaatit.fi/sertifikaatit/siltojen\\_vedeneristaja](https://rakentamisesertifikaatit.fi/sertifikaatit/siltojen_vedeneristaja).

Gajda, T., Germaniuk, K. & Rymsza B. 2016. Przegląd Incydentów Powstawania Pęcherzy pod Hydroizolacją Na Obiektach Mostowych. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, Nr 21, s.113-124.

Heilelassie, B. & Partl, M. 2012. Mechanisms of Asphalt Blistering on Concrete Bridges. Journal of ASTM International, (vol) 9, No. 3, s.1-16.

Henderson, E., Finch, G. & Hubbs, B. 2020. Solutions to Address Osmosis and the Blistering of Liquid Applied Waterproofing Membranes. Building Science and the Physics of Building Enclosure Performance. Developed by committee: E06. s. 177-194. ISBN 978-0-8031-7681-2.

Ignoul, S., Rickstal, F. & Gemert, D. 2004. Blistering of epoxy industrial floor on concrete substrate: phenomena and case study. Belgium: Department of civil engineering.

Julku, J. 2016. Betonisen siltakammen epoksitiivistyksen laadunhallinta. Espoo: Aalto yliopisto, diplomityö, s.67+7.

Graczyk, M., Zbiciak, A., Michalczyk, R. & Kowalewski, L. 2016. Numerical modelling of bubbles formation in the bridge asphalt pavement under gas pressure impact. Transportation Research Procedia, (vol) 14, s.3925-3934.

Hongying, L., Yan, L., Qiang, Z. & Peiwen Hao 2018. Deformation characteristic and mechanism of blister in cement concrete bridge deck pavement. *Construction and Building Materials*, (vol) 172, s.358-369.

InfraRYL, 2021. RYL-palvelu, InfraRYL [verkkodokumentti]. Helsinki: Rakennustieto. Käyttöoikeus rajattu [viitattu 21.3.2022].

Kuronen, J. 2022. Asiantuntijahaastattelu 25.3.2022.

Laukkanen, K. 2006. Kermieristyskoerakenteiden kunto 2005 – Sukuran ja Karhunkankaan sillat. Helsinki: Tiehallinnon selvityksiä 1/2006, 47 s. ISBN 951-803-326-9.

Laukkanen, K., Hemming, P., Pitkänen, P. & Vesikari E. 1998. Siltojen kermieristysten kuplimisen estäminen - Loppuraportti. Tielaitoksen selvityksiä 45/1998, 102 s. ISBN 951-726-474-7.

Liao, M. & Luo, R. 2022. Influencing factors and mechanism of blistering in epoxy asphalt mixtures for steel deck pavements. *Construction and Building Materials*, (vol) 316, s.1-12.

Liikenneviraston ohjeita 2/2017. Sillan vedeneristystyömaan laadunmittaus 2017. Helsinki: Liikennevirasto, 63 s. ISBN 978-592-317-364-4.

Liikenneviraston ohjeita 24/2017. Eurokoodin soveltamisohje – Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1 6.12.2017. Helsinki: Väylävirasto, 91 s. ISBN 978-952-317-486-3.

Liikenneviraston ohjeita 32/2017. Teräsbetoninen ulokelaattasilta (Bul) - Suunnitteluohje. Helsinki: Liikennevirasto, 55 s. ISBN 978-952-317-426-9.

Lu, H., Hao, J., Zhong, J., Wang, Y. & Yang, H. 2020. Analysis of Sunshine Temperature Field of Steel Box Girder Based on Monitoring Data. *Advances in Civil Engineering*, (vol) 2020, s.10.

PANK-5102. Päällysteen tasaisuus, oikolauta.

PANK-5103. Pintakarkeus, lasihelminen menetelmä.

Pakanen, T. 2014. Sillan vesieristyksen menetelmäselostus. Oulu: opinnäytetyö.

Pfaff, F. & Gelfant, F. 1997. Osmotic Blistering of Epoxy Coatings on Concrete. Journal of Protective Coatings & Linings. December 1997. s.52-64.

Rateko 2021. Siltojen ja muiden liikennöityjen alueiden vedeneristystöiden koulutus. Koulutusmaterialit. 2.-3.11.2021.

RIL 179-2018. Sillat – Suunnittelu, toteutus ja ylläpito. Helsinki: Kirjakaari Oy, 509. ISBN: 978-951-758-629-0.

Saarinen, J. & Vuorikoski, S. 2021. Sillan vedeneristystyömaan laadunvarmistus. Espoo: Siltojen ja muiden liikennöityjen alueiden vedeneristäjä (Siltojen vedeneristäjä) -koulutus, 2.-3.11.2021.

Sarnowski, M., Radziszewski, P., Kowalski, K. & Król, J. 2014. Impact of high process temperature on viscoelastic properties of polymer modified bitumen in waterproofing and bridge pavements. Road pavements, s.325-330.

SFS-EN 12697-21. Asfalttimassat. Testausmenetelmät. Osa 21. Levynäytteen painuma.

SFS-EN 130136-7. Road and airfield surface characteristics, Test methods. Part 7: Irregularity measurement of pavement courses: the straightedge test.

SFS-EN 1990 + A1. Rakenteiden suunnitteluperusteet.

SFS-EN 1991-1-1. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, omapaino ja rakennusten hyötykuormat. Suomen standardoimisliitto SFS, 72 s.

SFS-EN 1991-1-4. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat: Tuulikuormat. Suomen standardoimisliitto SFS, 255 s.

SFS-EN 1991-1-5. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-5: Yleiset kuormat: Lämpötilakuormat. Suomen standardoimisliitto SFS, 69 s.

SFS-EN 1991-2. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat. Suomen standardoimisliitto SFS, 144 s.

SILKO 2021. Ohje 2.240 Vedeneristyksen alustan kunnostus. Helsinki: Väylävirasto.

Siitonen, P. 2021. Asiantuntijahaastattelu. 2.11.2021.

Vuorikoski, S. 2022. Asiantuntijahaastattelu. 1.4.2022.

Väyläviraston ohjeita 4/2019. Täydentäviä ohjeita siltojen suunnitteluun 2.12.2019. Helsinki: Väylävirasto, 78 s. Saatavissa: [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2019-04\\_toss\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2019-04_toss_web.pdf).

Väyläviraston ohjeita 5/2022. Eurokoodin soveltamisohje – Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI2. Helsinki: Väylävirasto, 122 s. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf22/vo\\_2022-5\\_NCCI\\_2\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf22/vo_2022-5_NCCI_2_web.pdf).

Väyläviraston ohjeita 41/2020. Infrabetonien valmistus. Helsinki: Väylävirasto, 42 s. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo\\_2020-41\\_infrabetonien\\_valmistus\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2020-41_infrabetonien_valmistus_web.pdf).

Wolff, L., Raupach, M. & Hailu, K. 2007. Ursachen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton - Welche Rolle spielt die Osmose? Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 7, s.439-449.

Zhao, H., Cao, Y., Sit, S., Lineberry, Q. & Pan, W. 2012. Thermal characteristics of bitumen pyrolysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (vol) 107, s.541-547.