



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Iida Korpela

# Kemialliset ankkurit korkeissa lämpötiloissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

17.5.2020

Tekijä Otsikko	Iida Korpela Kemialliset ankkurit korkeissa lämpötiloissa
Sivumäärä Aika	49 sivua 17.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Lehtori Jouni Ruotsalainen Vanhempi konsultti Kimmo Ylinen
<p>Erilaisia jälkikiinnitettäviä ankkureita käytetään kiinnityksissä jo kovettuneeseen betoniin. Tämä opinnäytetyö keskittyy niistä kemiallisiin ankkureihin. Tutkimukset ovat osoittaneet, että ankkurointimassat voivat olla herkkiä erilaisille asennuksen ja käytön aikaisille olosuhteille, kuten lämpötila, kosteus ja erilaiset porattuun reikään liittyvät tekijät. Tämä opinnäytetyön tarkoitus on selvittää näiden tekijöiden vaikutuksia kemiallisten ankkureiden ominaisuuksiin, kuten lujuuteen ja käyttöikään. Pääpaino on korkean lämpötilan ja pysyvän kuormituksen vaikutuksilla. Korotettu lämpötila voi muuttaa ankkurointimassan pehmeäksi ja kumimaiseksi ja siten heikentää sen tartuntalujuutta.</p> <p>Opinnäytetyötä tehdessä perehdyttiin aihetta koskevaan kirjallisuuteen, esimerkiksi eri ankkureita käsitteleviin tutkimushankkeisiin ja niiden tuloksiin. Lisäksi perehdyttiin eri organisaatioiden julkaisemiin standardeihin sekä arviointiohjeisiin Euroopassa ja Yhdysvalloissa. Uusimpana näistä jälkikiinnitettäviä ankkureita käsittelevä standardi EN 1992-4, joka julkaistiin vuonna 2018.</p> <p>Korkean lämpötilan ja muiden tekijöiden vaikutus kemiallisten ankkureiden lujuuteen vaihtelee merkittävästi eri tuotteiden välillä. Ankkurin käyttöikä ja eri tekijöiden vaikutusta siihen voi arvioida luotettavasti vain ankkureiden testauksen avulla. Tässä opinnäytetyön raportissa esitetään joidenkin ulkoisten olosuhteiden, ja erityisesti pysyvästi korkean lämpötilan sekä pitkäaikaisen kuormituksen vaikutuksia kemiallisten ankkureiden käyttöikään.</p>	
Avainsanat	kemiallinen ankkuri, tartunta-ankkuri, lämpötila, pitkäaikaiskuormitus, betoni

Author Title	Iida Korpela Bonded Anchors at Elevated Temperatures
Number of Pages Date	49 pages 17 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Jouni Ruotsalainen, Senior Lecturer Kimmo Ylinen, Senior Consultant
<p>Different kind of post-installed anchors are used to make connections to hardened concrete. This thesis focuses on adhesive anchors. Studies have shown that adhesives can be sensitive to different installation and in-service conditions, for example, temperature, moisture and conditions of the drilled hole. The purpose of this thesis was to present some of those factors and especially focus on the effects of elevated temperature and sustained loading. Elevated temperature can make adhesives rubbery, which weakens the bond strength of the anchor.</p> <p>This thesis was based on conducting a literature review related to adhesive anchors. A variety of research projects and their results as well as a collection of standards and assessment documents from different organizations both in Europe and USA were surveyed. The new Eurocode standard EN 1992-4 published in 2018 is focused on post-installed anchors and was especially of interest.</p> <p>On the basis of the results from the studied research projects, it seems clear that the elevated temperature could have a negative effect on adhesive anchors. However, there is a great amount of variation between products and their properties thus testing of the anchors is the only reliable method of assessment. As a result of this thesis, this report presents some of the current knowledge related to adhesive anchors and factors affecting their service life.</p>	
Keywords	bonded anchor, elevated temperature, sustained loading

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Taustaa	1
1.2	Tavoite ja rajaus	2
2	Betoniin kiinnitettävät ankkurit	4
2.1	Erilaiset ankkurit ja niiden toiminta	4
2.2	Kemialliset ankkurit	5
2.2.1	Murtotavat	8
2.2.2	Massat ja niiden ominaisuudet	10
2.2.3	Kemiallisten ankkureiden suunnittelu ja valinta	11
2.2.4	CE-merkintä	12
3	Kemiallisten ankkureiden toimintaan vaikuttavat tekijät	14
3.1	Ankkuriin liittyvät tekijät	14
3.2	Asennukseen liittyvät tekijät	15
3.3	Betoniin liittyvät tekijät	16
3.4	Käyttöolosuhteisiin liittyvät tekijät	17
3.5	Korotettu lämpötila ja pysyvä kuormitus	17
3.5.1	Viruma	18
3.6	Onnettomuudet	20
4	Merkittäviä aiheeseen liittyviä tutkimushankkeita	26
4.1	Dusel & Mir	26
4.2	Cook & Konz	28
4.3	Davis	30
4.4	Nilforoush	32
5	Standardit, tuotehyväksynät, suunnitteluohjeet	36
5.1	Eurooppa	37
5.1.1	Eurokoodi EN 1992-4	37

5.1.2	Hyväksyntämenettelyohje ETAG 001	38
5.1.3	Eurooppalainen tekninen arviointi EAD 330499-00-0601	39
5.2	Yhdysvallat	40
5.2.1	American Concrete Institute	41
5.2.2	International Code Council	41
6	Suunnittelu- ja arviointimenetelmiä kohtaan esitetty kritiikki	43
7	Tulokset	46
8	Yhteenveto	47
	Lähteet	50

## Lyhenteet ja merkinnät

AASHTO	The American Association of State Highway Transportation Officials
ACI	American Concrete Institute
ASD	Allowable Stress Design (Allowable Strength Design)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CALTRANS	California Department of Transportation
CEN	European Committee for Standardization
DoP	suoritustasoilmoitus (engl. declaration of performance)
EAD	European Assessment Document, eurooppalainen arviointiasiakirja
EOTA	European Organisation of Technical Assessment
ETA	European Technical Assessment, eurooppalainen tekninen arviointi
ETAG	European Technical Approval Guideline, eurooppalainen tekninen hyväksyntäohje
HDT	taipumislämpötila (engl. Heat Deflection Temperature, Heat Distortion Temperature)
hEN	harmonisoitu tuotestandardi
ICC-ES	International Code Council Evaluation Service
LFRD	Load and Resistance Factor Design
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program

RISE	Research Institutes of Sweden
TAB	tekninen arviointilaitos (engl. Technical Assessment Body)
$d, d_a$	ankkurin halkaisija
$d_0$	betoniin poratun reiän halkaisija
$h_{ef}$	tehollinen ankkurointisyvyys
$\psi_{sus}^0$	tuotteesta riippuva kerroin, jolla otetaan huomioon pitkäaikaiskuorman vaikutus tartuntalujuuteen, ja joka on esitetty ankkurin eurooppalaisessa teknisessä tuote-eritelmässä

# 1 Johdanto

## 1.1 Taustaa

Kovettuneeseen betoniin voidaan tehdä kiinnityksiä erilaisten jälkiasennettavien ankkureiden avulla. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kemiallisia ankkureita, ja erityisesti korotetun lämpötilan vaikutusta niiden toimintaan. Kemiallisten ankkureiden toiminta perustuu ankkurointimassan komponenttien sekoittuessa tapahtuvaan kemialliseen reaktioon, joka kovettaa ankkurointimassan. Kovettunut massa muodostaa sidoksen sekä ankkurointimassan ja teräsosan, kuten kierretangon tai harjateräksen välille, että ankkurointimassan ja betonin välille. Kuormat siirtyvät teräsosalta betonille ankkurointimassan välityksellä. Ankkureiden toimintaan vaikuttavat erilaiset asennuksen ja käytön aikaiset olosuhteet. Kemialliset ankkurointimassat ovat alttiita virumalle, ja pysyvästi korkea lämpötila yhdistettynä pysyvään kuormitukseen voi heikentää niiden tartuntalujuutta.

Jälkiasennettavien ankkureiden suunnittelu noudattaa Suomessa standardia EN 1992-4, Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 4: Design of fastenings for use in concrete [1]. Kyseinen standardi tuli voimaan vuonna 2018 ja korvasi aiemmat ohjeet: ETAG-001, Annex C sekä CEN/TS 1992-4. Uusi standardi on laadittu CEN/TS 1992-4 pohjalta, mutta siihen sisältyy muutamia oleellisia muutoksia. Tämän opinnäytetyön kannalta oleellisin on EN 1992-4 kohta 7.2.1.6, josta on tulkittavissa, että mikäli kemiallinen ankkuri on pysyvästi korkeassa lämpötilassa pitkäaikaisesti kuormitettuna, saattaa sen käyttöikä olla rajattu vain kymmeneen vuoteen. Tämän jälkeen ankkurin kestävyyttä ja mahdollisesti jäljellä olevaa käyttöikää tulisi arvioida uudelleen. Ankkurin suunnitellun käyttöiän olisi käytännöllistä vastata rakenteen käyttöikää, mikä johtaa siihen, että joissain tilanteissa kemiallisten ankkureiden käyttöä voi olla syytä välttää. Tämä koskee erityisesti tilanteita, joissa ankkuri on käyttöikänsä aikana pitkäaikaiskuormitettu korotetussa lämpötilassa.

Teollisuuden rakennuksissa voi olla erilaisia tiloja, joissa rakenteiden lämpötila on pysyvästi korkea, esimerkiksi ydinvoimalaitoksissa, sulatoissa sekä sellu- ja paperitehtaissa. Rakenteiden lämpötila voi myös vaihdella niin, että aikajaksot, joissa lämpötila vaihtelee, ovat merkittävästi pidempiä kuin esimerkiksi puolen vuorokauden mittaisia. Tyypillisesti lyhytaikaiset lämpötilavaihtelut määritellään sen perusteella, että sykliä ovat lyhyitä, kuten



esimerkiksi lämpötilavaihtelut yön ja päivän välillä. Rakenteisiin voi olla tarpeen tehdä turvallisuuden kannalta kriittisiä kiinnityksiä, jolloin on erityisen tärkeää olla varma kemiallisten ankkureiden ominaisuuksista ja kestävyydestä kaikissa ankkurin käyttöiän aikana ilmenevissä olosuhteissa.

Ankkureiden ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti tuotekohtaisesti, ja siten vaihtelee myös niiden soveltuvuus erilaisiin käyttökohteisiin. Esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Japannissa on tapahtunut onnettomuuksia kohteissa, joissa ominaisuuksiltaan väärentyyppisillä kemiallisilla ankkureilla on tehty kiinnityksiä, joissa ankkurit ovat olleet pysyvästi kuormitettuja. Myös asennustyön virheellisyyteen on kiinnitetty huomiota onnettomuustutkinnoissa. Vähäinen ymmärrys kemiallisten ankkureiden viskoelastisista ominaisuuksista sekä niiden alttiudesta virumalle on johtanut standardien ja hyväksyntämenettelyiden päivitykseen viimeisten vuosien aikana.

Tämä opinnäytetyö on tehty AFRY Finland Oy:n prosessiteollisuuden rakennesuunnitteluosaston toimeksiannosta. Ankkureiden suunnittelua ohjaavan standardin EN 1992-4 ja testausta ohjaavan eurooppalaisen arviointiasiakirjan, EAD-330499-00-0601, Bonded fasteners for use in concrete [2], julkaisujen myötä konkretisoitui tarve ymmärtää paremmin kemiallisten ankkureiden toimintaa erilaisten käyttöolosuhteiden vallitessa. Selvityksen pääpaino on tilanteissa, joissa ankkuri on pysyvästi korkeassa lämpötilassa jatkuvasti kuormitettuna.

## 1.2 Tavoite ja rajaus

Työn tavoitteena on esittää kemiallisten ankkureiden asennuksen ja käytön aikaisten tekijöiden ja olosuhteiden vaikutusta ankkureiden kestävyteen. Pääosassa on erityisesti pitkäaikaisen korkean lämpötilan ja kuormituksen vaikutukset tyypillisten kemiallisten ankkureiden ominaisuuksiin ja käyttöikään. Samalla selvitetään, onko mahdollisesti muita käyttöikään vaikuttavia tekijöitä, jotka eivät välttämättä sisälly eurooppalaisen arviointidokumentin (EAD) mukaiseen ankkureiden arviointiin. Tarkoitus on myös esitellä, mille oletuksille kemiallisille ankkureille suoritettavat kokeet perustuvat.

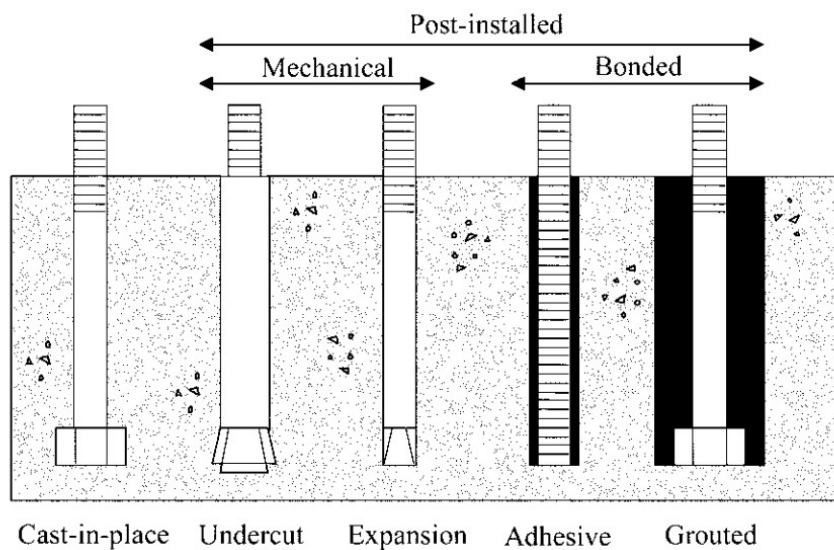
Tarkastelun kohteena ovat ainoastaan kemialliset ankkurit, jolloin muut jälkiasennettavat ankkurit sekä betonivaluun asennettavat ankkurit jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Työssä

arvioidaan kemiallisia ankkureita, joilla on EAD-330499-0601 mukainen eurooppalainen tekninen arviointidokumentti (ETA). Työssä ei esitellä ankkureiden mitoitusta yleisesti, vaan pääpaino on käyttöolosuhteiden, erityisesti pitkäaikaisen korkean lämpötilan ja jatkuvan rasituksen mahdollisissa vaikutuksissa ankkureiden käyttöikään. Korkean lämpötilan oletetaan vaikuttavan koko rakenteen käyttöiän ajan, poisluettuna lyhyet katkot esimerkiksi huollon takia.

## 2 Betoniin kiinnitettävät ankkurit

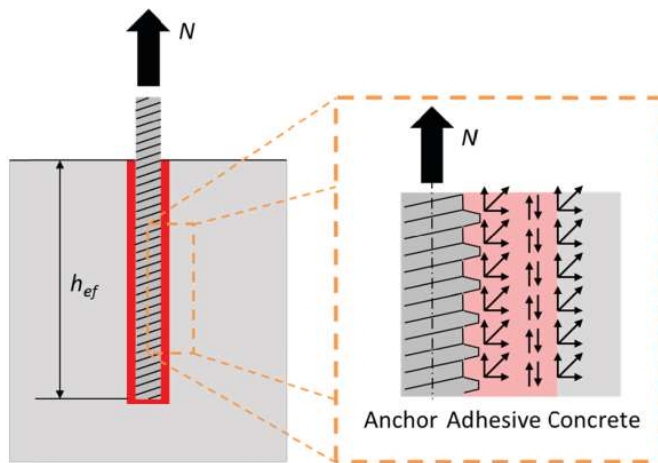
### 2.1 Erilaiset ankkurit ja niiden toiminta

Betonirakenteisiin voidaan tehdä kiinnityksiä erilaisten ankkureiden avulla. Ankkurit voidaan jakaa betonivaluun sijoitettaviin ankkureihin, kuten peruspultit, sekä erilaisiin jälki-kiinnitettäviin ankkureihin. Jälkikiinnitettävien ankkureiden avulla voidaan tehdä kiinnityksiä jo kovettuneeseen betoniin. Jälkikiinnitettävät ankkurit voidaan jakaa edelleen mekaanisiin ankkureihin sekä tartunta-ankkureihin. Tässä työssä käsiteltävät kemialliset ankkurit on esitetty kuvassa 1 toisena oikealta.



Kuva 1. Erilaisia ankkurityyppejä. Toisena oikealta esitetty kemiallinen ankkuri. [3, s. 822]

Mekaaniset ankkurit, kuten kiila-ankkurit ja betoniruuvit, lukittuvat betoniin esimerkiksi laajenemalla. Tartunta-ankkureita ovat erilaiset jälkivaletut ankkurit, kuten varauskoloihin sijoitettavat tyssäpäiset vaarnat, sekä erilaiset kemialliset ankkurit. Kemiallinen ankkuri koostuu teräksisestä ankkuriosasta sekä kemiallisesta ankkurointimassasta. Tartunta-ankkureiden toiminta perustuu sidokseen ankkuroivan massan ja teräksisen ankkuriosan sekä massan ja betonin välillä. Kuormien oletetaan siirtyvän teräsosalta ankkurointimassan välityksellä betonille tasaisesti koko tehollisen ankkurointisyvyyden matkalla (Kuva 2). Kemiallisissa ankkureissa massat ovat yleensä hartsipohjaisia ja ne sisältävät myös kovetteen, jota jälkivalettavat ankkurointimassat eivät yleensä sisällä. [4]



Kuva 2. Kuormien siirtyminen ankkurilta ankkurointimassan välityksellä betonille. [5, s. 4]

Kun kemiallisen ankkurointimassan komponentit sekoittuvat, niiden välinen reaktio kovettaa liimamassan ja muodostaa sidoksen betonin sekä ankkuritangon kanssa. Ankkuroinnissa käytettävät massat voivat olla orgaanisia, epäorgaanisia tai niiden sekoituksia. Lisäksi ankkurointimassoissa voidaan käyttää erilaisia lisäaineita parantamaan niiden ominaisuuksia. [3, s. 822; 4.]

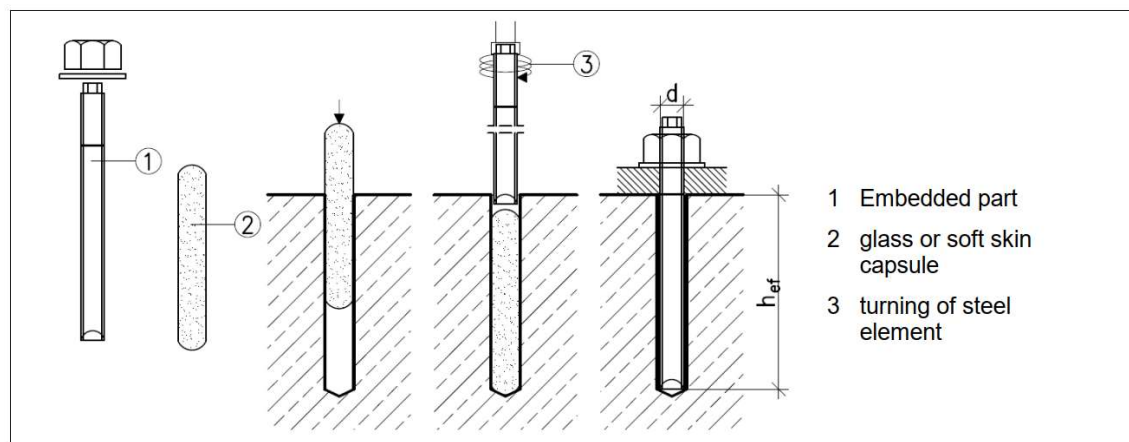
Kemiallisia ankkureita varten betoniin porattavat reiät ovat yleensä halkaisijaltaan enintään  $1,5 \cdot d_a$ , tyypillisesti vain  $1,1 \dots 1,25 \cdot d_a$ . Jälkivalettujen ankkureiden asennuksen vaatimat reiät ovat suurempia, tyypillisesti noin  $1,5 \dots 2 \cdot d_a$ . Kokeiden perusteella kemiallisilla ankkureilla on mahdollista saavuttaa suurempia tartuntalujuuksia kuin mekaanisilla ankkureilla, kun lämpötila käyttöiän aikana on noin  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kemialliset ankkurit voidaan myös sijoittaa lähemmäs toisiaan kuin mekaaniset ankkurit. [3, s. 823; 6, s. 1; 7, s.9; 8, s. 48.]

## 2.2 Kemialliset ankkurit

Kemialliset ankkurit kehitettiin Saksassa 1960- ja 1970-lukujen aikana [4]. EN 1992-4 määrittelee kemiallisen ankkurin seuraavasti:

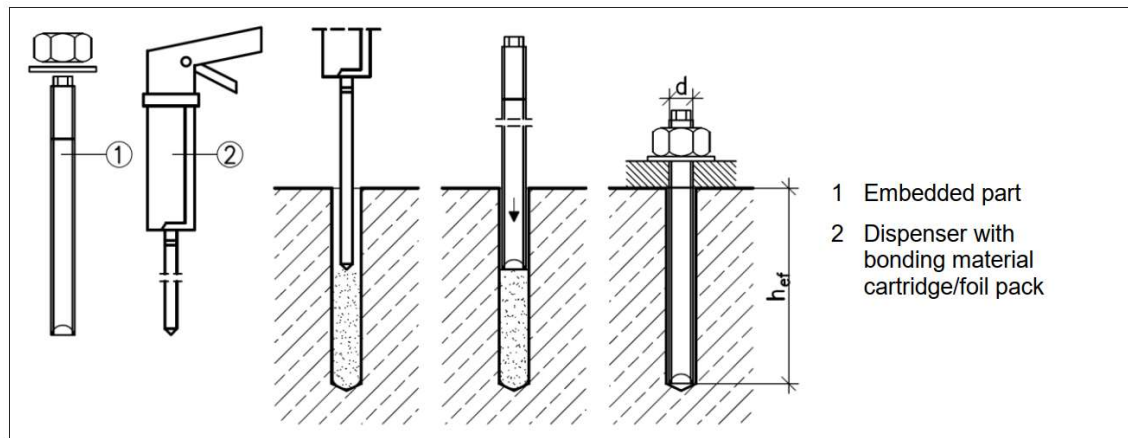
”kovettuneeseen betoniin porattuun reikään asennettu kiinnike, jonka lujuus muodostuu betonissa olevan reiän seinämän ja reikään upotetun kiinnikkeen välissä olevan kemiallisen massan tartunnasta” [9, s. 12]

Kemialliset ankkurointimassat ovat usein kaksikomponenttisia kertamuoveja, ja ne koostuvat hartsista ja kovetteesta (epoksi) tai hartsista ja katalyytistä (akrylaatti). Lisäksi ne voivat sisältää erilaisia täyteaineita, kuten kvartssia. Kiinnitykseen tarvitaan myös ankkuritanko, usein kierre- tai harjaterästanko. Sileät tangot eivät ankkuroidu kovin tehokkaasti, joten teräsosassa on usein jonkinlainen tartuntaa edistävä pinta, kuten esimerkiksi kierteet. Kemiallisten, myös tartunta- tai liima-ankkureiksi (englanninkielinen termi bonded anchor, adhesive anchor) kutsuttavien ankkurituotteiden toiminta perustuu kemialliseen reaktioon, jonka seurauksena massa kovettuu ja kiinnittyy betoniin sekä ankkuritankoon. Kuormat siirtyvät terästangon välityksellä liimamassalle ja siitä eteenpäin betonirakenteelle. Kuormien oletetaan siirtyvän tasaisesti koko ankkurointisyvyyden matkalla. Kemiallisten ankkureiden avulla on mahdollista tehdä kiinnityksiä jo kovettuneeseen betoniin, mikä on lisännyt niiden suosiota rakentamisessa. Niiden avulla voidaan ankkuroida myös betoniteräksisiä tartuntoja jo olemassa oleviin betonirakenteisiin. [7, s. 15; 8, s. 20; 10, s. 1.]



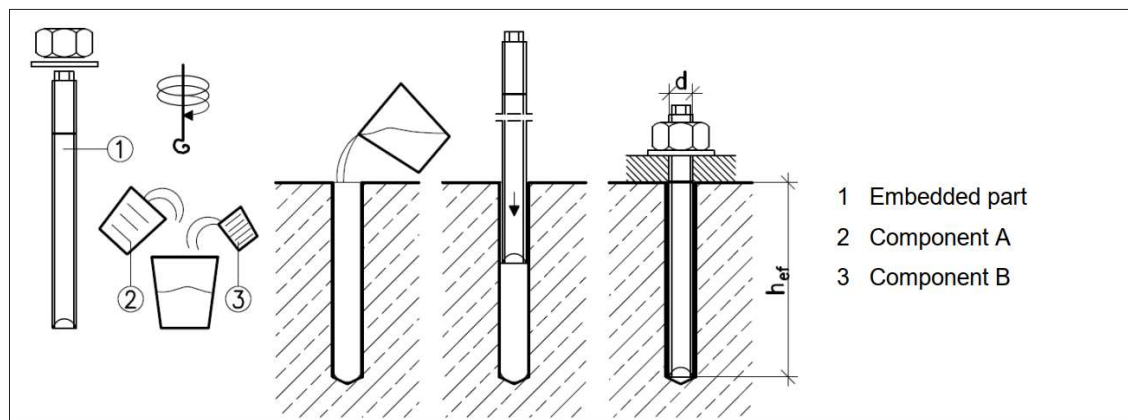
Kuva 3. Lasi- tai foliokapseliin pakattu ankkurimassa ja sen asennus. [2, s.5.]

Kemialliset ankkurit ovat yleensä pakattu valmiiksi annosteltuina joko lasi- tai foliopakkauksiin, patruunoihin tai kapseluihin, joissa sen komponentit ovat erillä toisistaan. Kapseluihin pakatut massat voidaan asentaa suoraan betoniin porattuun reikään (Kuva 3), ja suuremmissa patruunoissa tulevat massat injektoidaan reikään erillisen patruunapuristimen avulla (Kuva 4). Joitain tuotteita on myös saatavilla irtotavarana, useimmiten suuremmissa erissä, jolloin aineiden annostelu ja sekoitus on asentajan vastuulla (Kuva 5).



Kuva 4. Injektoitava ankkurimassa ja sen asennus. [2, s.5.]

Injektoitavat, patruunoihin annostellut massat sekoittuvat, kun ne puristetaan patruunapuristimen sekoitussuuttimen läpi (Kuva 4). Folio- tai lasikapseleiden kohdalla molemmat aineet ovat toisista erillään, mutta samassa yhdessä pakkauksessa. Aineet sekoittuvat, kun kapseli asetetaan sitä varten betoniin porattuun reikään, ja terästanko asennetaan paikalleen poravasaran avulla (Kuva 3). Poravasaran pyörivä liike rikkoo kapselin ja sekoittaa aineet toisiinsa.



Kuva 5. Irtotavarana oleva ankkurointimassa ja sen annostelu sekä asennus. [2, s.6.]

Betoniin porattava reikä tehdään tyypillisesti poravasarella, mutta myös timanttiporan käyttö on mahdollista. Timanttiporalla tehdyn reiän seinämät voidaan karhentaa siihen tarkoitettulla erikoistyökalulla. Valmistaja määrittelee sallitut asennustavat tuotekohtaisesti. Osa ankkureista ei ole yhtä herkkiä työmaolosuhteille kuin toiset, ja niitä voidaan

asentaa jopa puhdistamattomiin reikiin. Ohjeiden vastainen asennus voi vaikuttaa ankkurin kapasiteettiin.

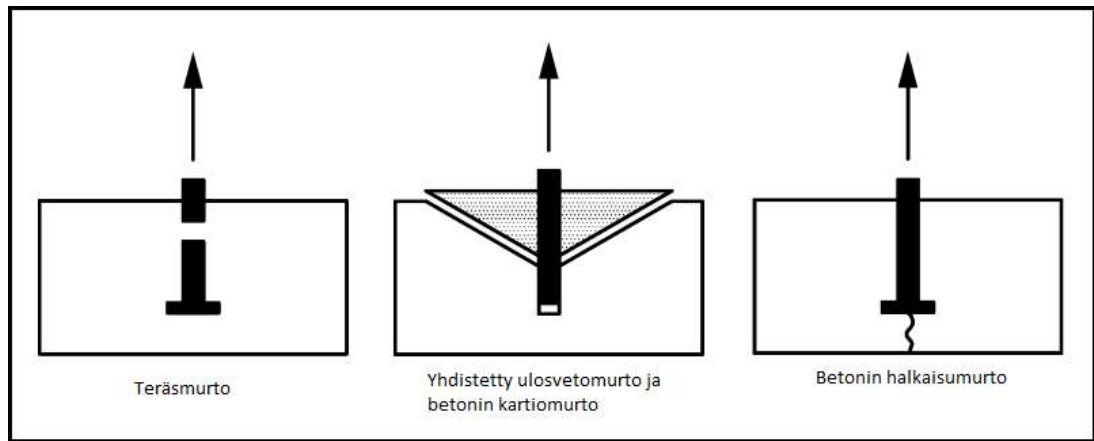
Kemialliset ankkurit ovat kasvattaneet suosiotaan viime aikoina, sillä ne mielletään helpokäyttöisiksi. Niiden asennus jo kovettuneeseen betoniin on etu korjausrakentamisessa ja mahdollistaa joustavuutta suunnittelussa. Kemialliset ankkurit ovat kuitenkin toiminnaltaan epävakaampia kuin valuun asennettavat ankkurit. Siksi kemiallisten ankkureiden toimintaa ja suorituskykyä niiden käyttöiän aikana on vaikeampi ennustaa kuin valuun asennettavien ankkureiden. [11, s. 1-5; 12.]

Kemiallisten tartunta-ankkureiden ominaisuudet ovat riippuvaisia ajasta ja lämpötilasta. Ankkurointimassat ovat herkkiä pitkäaikaiselle kuormitukselle sekä korkeille lämpötiloille, sillä ne voivat aiheuttaa massan molekyylien liikettä toistensa suhteen, jolloin ne liukuvat toistensa ohi. Tämä molekyylien uudelleen järjestyminen aiheuttaa virumaa. Nämä muodonmuutokset eivät usein ole lineaarisia, vaan ne riippuvat kuormituksen suuruudesta ja kestosta sekä erilaisista kemialliseen ankkuriin liittyvistä tekijöistä. Useat ankkureiden ominaisuudet ovat riippuvaisia niiden kemiallisesta koostumuksesta, jolloin käyttöympäristön vaikutukset ankkureiden ominaisuuksiin voivat erota toisistaan huomattavasti markkinoilla olevien tuotteiden välillä. [11, s. 1-5; 12.]

### 2.2.1 Murtotavat

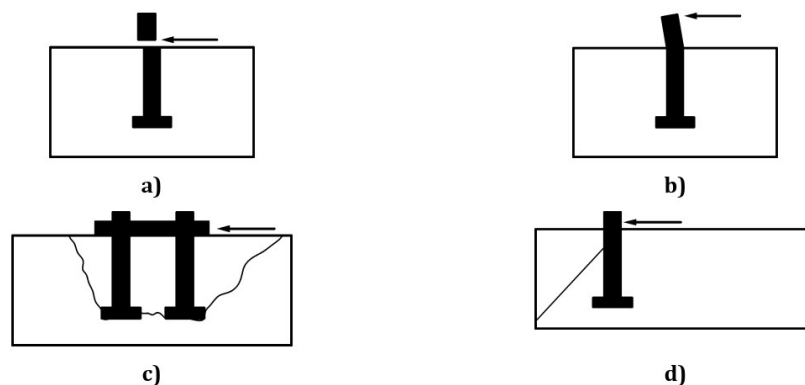
Vetorasitettujen kemiallisten ankkureiden mahdollisia murtotapoja ovat betonin halkaisumurto, teräsmurto sekä yhdistetty ulosvetomurto ja betonin kartiomurto (Kuva 6). Yhdistetyssä ulosvetomurrossa ja betonimurrossa murtuminen tapahtuu ankkurimassan ja kiinnikkeen välillä ja kiinnikkeen yläosassa tapahtuu betonin kartiomurto [9, s.12-13; 14 s. 46; 2, s.47]. Nilforoush [11, s.14-16] esittää, että yhdistetyssä murrossa murto voi tapahtua betonin ja liimamassan välillä, liimamassan ja teräsosan välillä tai molemmissa.

Leikkauskuormituksessa murtotapoja ovat betonin kampeamismurto, teräsmurto sekä betonin reunamurto (Kuva 7) [9, s.13, 61].



Kuva 6. Kemiällisen ankkurin murtotavat vetorasituksessa, mukailten EN 1992-4 [9, s.46.]

Ankkurin murtotapaan vaikuttaa pääosin sen ankkurointisyvyys [11, s.15]. Kartiomurto on dominoivin murtotapa, kun ankkurointisyvyys on pieni, jolloin  $h_{ef}$  on välillä  $3d \dots 5d$ , ja tartuntalujuus on suhteellisen suuri. Kun ankkurointisyvyys on suurempi, on murtotapa yleensä yhdistetty ulosvetomurto ja kartiomurto [4]. Jos ankkurointisyvyys on erittäin suuri, on teräsmurto mahdollinen, sillä tartuntalujuus ankkurin matkalla voi ylittää teräsosan vetolujuuden [7; s. 12; 11, s.16].



**Selite**

- a) teräsmurto ilman momenttivartta
- b) teräsmurto momentivarren kanssa
- c) betonin kampeamismurto
- d) betonin reunamurto

Kuva 7. EN 1992-4 kohdassa 7.2.2.1 esitetyt ankkurin murtotavat leikkauskuormituksessa [9, s.61.]



## 2.2.2 Massat ja niiden ominaisuudet

Kemialliset ankkurointimassat (hartsit) voivat olla orgaanisia, epäorgaanisia tai niiden sekoituksia. Orgaanisia aineita ovat esimerkiksi epoksi, polyuretaani, polyesteri, metyyliimetakrylaatti sekä vinyyliesteri. Epäorgaaniset massat voivat olla esimerkiksi sementtipohjaisia. Massojen erilaisista kemiallisista koostumuksista johtuvat merkittävät erot eri massojen ominaisuuksissa ja siten niiden soveltuvuudessa erilaisiin käyttöolosuhteisiin. [4; 15, s.5-6.]

Epoksipohjaiset kemialliset ankkurit ovat epoksihartsista ja kovetteesta koostuvia synteettisiä yhdisteitä, jotka vaativat lämpöä kovettuaan. Tämä lämpö muodostuu edellä mainittujen komponenttien välisessä eksotermisessä kemiallisessa reaktiossa, jossa hartsi polymeroituu ja kovettuu. Epoksit eivät kutistu kovettuessaan, mutta ovat herkkiä korkeille lämpötiloille. Ne ovat kestäviä, ja säilyvät oikein varastoituina pitkään. Polyesteripohjaiset liimamassat koostuvat polyesterihartsista ja katalyytistä (esimerkiksi bentsoyyliperoksidi), ja ne vaativat myös lämpöä kovettuaan. Polyesterimassat kovettuvat epoksimassoja nopeammin, mutta kutistuvat kovettuessaan. Kutistumista voidaan vähentää erilaisten täyteaineiden avulla, jotka kuitenkin samalla kasvattavat seoksen viskositeettiä. Polyesterimassojen säilyvyysaika on lyhyempi kuin epoksien. Polyesterihartsit voivat polymerisoida jopa ilman katalyyttiä korkeissa lämpötiloissa, ja lisäksi ne sietävät ultraviolettivaloa huonosti. Myös vinyyliesteripohjaiset ankkurointimassat, jotka koostuvat vinyyliesterihartsista ja kovettajana toimivasta katalyytistä (esimerkiksi bentsoyyliperoksidi), ovat lämmön avulla kovettuvia. Vinyyliesterimassat sijoittuvat säilyvyydeltään, kovettumisajaltaan ja polymerisaation osalta epoksien ja polyesterin välille. Erilaisilla hybridimassoilla on pyritty parempiin ominaisuuksiin esimerkiksi lämpötilaherkyyden kohdalla. Sementtiä sisältävät massat sietävät yleensä korkeita lämpötiloja paremmin kuin puhtaasti polymeeripohjaiset massat. Myös lisäaineilla voidaan vaikuttaa massojen ominaisuuksiin, esimerkiksi siihen, kuinka suuri taipumus massalla on virumaan. Lisäaineiden suuri määrä ankkurointimassassa voi kuitenkin muodostua ongelmaksi. Adnan Çolak havaitsi tutkimuksissaan, että lisäainepitoisuuden ja leikkauslujuuden välillä on selvä yhteys, ja suuri lisäainepitoisuus vähentää leikkauslujuutta kuormitettuna. [16, s. 807-808; 8, s.49; 17, s. 5; 18, s. 488-493; 19, s. 156; 15, s. 5-6; 7, s.10.]

Polymeeripohjaiset kemialliset ankkurointimassat ovat viskoelastisia, jolloin muodonmuutosten aikana niissä yhdistyvät sekä elastiset että viskositeettiset ominaisuudet. Kun

kuormitus on jatkuvaa tai lämpötila korkea, voivat polymeeriketjut liukua toistensa ohitse. Kuormitusajan ollessa lyhyt tätä liikettä ei tapahdu. Polymeerien viskoelastiset ominaisuudet tekevät niistä alttiita ajan myötä tapahtuville jännityksen ja lämpötilan aiheuttamille muodonmuutoksille eli virumalle. Tästä voidaan tehdä päätelmä, ettei polymeerin voida taata kestävän loputtomiin vetorasitusta, vaikka rasitus olisikin pienempi kuin lyhytaikaisissa kuormituskokeissa määritetty polymeerin vetolujuus. [20.]

Ympäristön lämpötilalla on merkittävä vaikutus kemiallisten ankkurointimassojen ominaisuuksiin. Kun lasittumislämpötila saavutetaan, muuttuu kovettunut liimamassa pehmeäksi ja kumimaiseksi. Lasittumislämpötila on tuotekohtainen, ja siihen voidaan vaikuttaa erilaisten lisäaineiden avulla, joko nostaen tai laskien sitä. Taipumislämpötila (HDT-lämpötila, engl. Heat Deflection Temperature, Heat Distortion Temperature) mittaa materiaalin muotopysyvyyttä ja sen kykyä kestää kuormitusta korotetussa lämpötilassa. Epoksipohjaisilla massoilla HDT-lämpötila on usein alhaisempi kuin polyesteripohjaisilla massoilla. Epoksipohjaisten liimamassojen kyky palautua lämpötilavaihteluiden jälkeen heikenee, jos massa altistetaan korkeille lämpötiloille toistuvasti. [16, s.806-808; 21, s. 248; 22, s. 646-648.]

### 2.2.3 Kemiaallisten ankkureiden suunnittelu ja valinta

Kemiaallisten ankkureiden suunnittelu tapahtuu standardia EN 1992-4 Betonirakenteissa käytettävien kiinnikkeiden suunnittelu [1] noudattaen. Ankkurin valinta riippuu sille käytön aikana aiheutuvasta kuormituksesta sekä muista käyttöolosuhteista, joille ankkuri altistuu. Kuormien suhteen on oleellista huomioida sekä niiden vaikutussuunta että kesto. Ympäristön vaikutuksia ovat esimerkiksi lämpötila ja kosteus. Ankkurin kestävyys suunnitteluarvot määrittävät ensisijaisesti teräsosan lujuus tai ankkurointisyvyydestä riippuva betonin kestävyys [3, s.822]. Vääränlaisen ankkurin valinnalla voi olla kohtalokkaat seuraukset, kuten Bostonissa Ted Williams -tunnelin tapauksessa, jossa tunnelin katon betonielementit romahtivat irronneiden kemiallisten ankkureiden seurauksena [23].

Kemiaallisten ankkureiden taipumus virumaan tekee niiden ominaisuuksien ja käyttäytymisen ymmärtämisestä eri käyttöolosuhteissa tärkeää. Tämä tarkoittaa olosuhteita sekä asennuksen että käyttöä aikana. Suunnittelijan tulee kiinnittää erityistä huomiota soveltuvan kemiallisen ankkurin valintaan tilanteissa, joissa ankkuri tulee olemaan pitkäaikaisesti vetorasitettuna [24]. Lämpötilan suhteen suunnittelijan on pystyttävä

määrittämään, mitkä ovat rakenteen minimi- ja maksimilämpötilat sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä, ja huomioimaan mahdollinen palolle altistuminen. Lyhytkestoiset lämpötilahuiput, jotka johtuvat esimerkiksi vuorokaudenajan vaihteluista, ovat usein helpommin ennustettavissa, mutta pitkäaikaisen maksimilämpötilan arvioiminen voi olla vaikeampaa. Valmistajan tuotekohtaiset rajaukset on otettava huomioon ankkurivalinnassa. Kaikki kemialliset ankkurit eivät esimerkiksi sovellu ylöspäin asennettaviksi tai edes vaakasuuntaisiin asennuksiin.

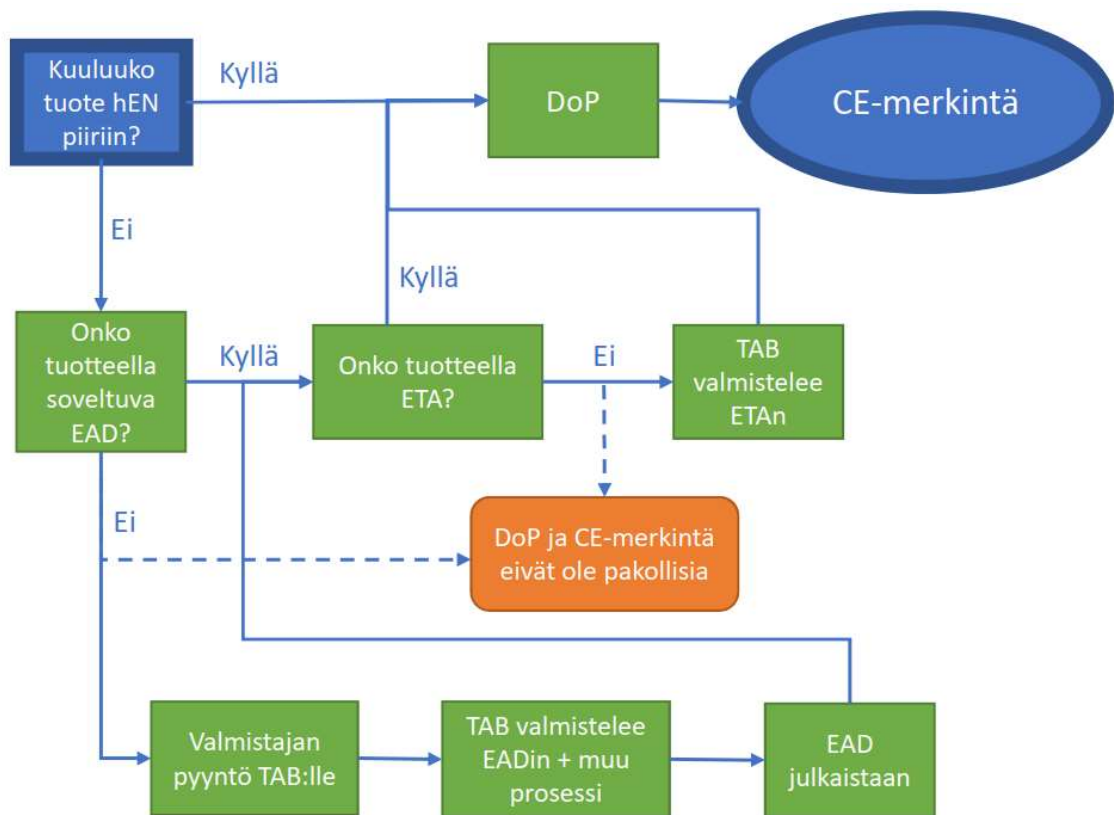
Eurooppalaisen arviointiasiakirjan EAD 330499-0601:n [2] mukaan ankkurin käyttölämpötila-alue tarkoittaa sitä aluetta, jonka rajoissa ympäristön lämpötila vaihtelee asennuksen jälkeen ankkurin käyttöänsä aikana. Lyhytaikainen maksimilämpötila on käyttölämpötila-alueen maksimi. Pitkäaikainen lämpötila tarkoittaa pysyvää tai lähes pysyvää lämpötilaa, jolle ankkuri altistuu käyttöikänsä aikana. Pitkäaikainen maksimilämpötila on valmistajan määrittelemä, ja on enintään lyhytaikaisen maksimilämpötilan verran, vaihdellen välillä 0,6...1 kertaa lyhytaikainen maksimilämpötila. [2, s. 7, 13-14.]

#### 2.2.4 CE-merkintä

CE-merkintä tarkoittaa valmistajan vakuutusta siitä, että kyseinen tuote täyttää sitä koskevien direktiivien vaatimukset. Joidenkin tuotteiden kohdalla CE-merkinnän saaminen edellyttää myös tuotteen testausta. CE-merkittyjen rakennustuotteiden myynti on sallittava kaikissa maissa Euroopan sisämarkkinoilla. Toinen CE-merkinnän etu on, että tuotteita voidaan verrata helposti keskenään CE-merkinnän ja suoritustasoilmoituksen (DoP) perusteella. CE-merkintä on pakollinen useimmille rakennustuotteille, mutta mikäli tuote ei kuulu minkään yhdenmukaistetun standardin piiriin, on CE-merkintä vapaaehtoinen. [25; 26, s.4-12.]

Kemialliset ankkurit eivät kuulu minkään harmonisoidun tuotestandardin piiriin, joten ne voidaan CE-merkitä niin sanotun EOTA-menettelyn kautta (Kuva 8). Tässä tapauksessa tuote tarvitsee soveltuvan eurooppalaisen arviointidokumentin, EAD:n, jonka perusteella sille voidaan myöntää eurooppalainen tekninen arviointi (ETA). ETA voidaan myöntää vain tuotteelle, joka ei kuulu eurooppalaisen harmonisoidun tuotestandardin (hEN) piiriin, vaan sen arviointi perustuu soveltuvaan EAD:iin. Mikäli valmistaja hankkii tuotteelleen ETA-arvioinnin, on tuote myös CE-merkittävä. ETA toimii pohjana suoritustasoilmoitukselle (DoP), jonka tuotteen valmistaja on velvollinen antamaan, jotta tuote voidaan CE-

merkitä. Suoritusasoilmoitus sisältää tiedot sekä valmistajasta että tuotteesta ja sen suoritusasosta, ja sitä voidaan pitää tärkeimpänä CE-merkintää varten vaadittavana asiakirjana. [26, s.4-12; 27.]



Kuva 8. Kuvassa esitetty CE-merkinnän vaatima prosessi.

### 3 Kemiallisten ankkureiden toimintaan vaikuttavat tekijät

Useat eri tekijät vaikuttavat kemiallisten ankkureiden ominaisuuksiin. Varsinkin virumaan liittyvät tekijät vaikuttavat olleen huonosti ymmärrettyjä, ja 2000-luvulla tapahtuneiden onnettomuuksien seurauksena ankkureiden lujuuteen vaikuttavia tekijöitä on tutkittu lisää. Eräs tapa luokitella näitä tekijöitä on jakaa ne ankkuriin liittyviin tekijöihin, asennukseen liittyviin tekijöihin sekä käyttöolosuhteisiin liittyviin tekijöihin. Myös jaottelua sisäisten ja ulkoisten tekijöiden välillä on esitelty. Siinä jaottelu perustuu siihen, että sisäiset tekijät ovat yleensä ankkurin materiaaleihin, valmistukseen tai sen pakkaukseen liittyviä tekijöitä, joihin valmistaja voi vaikuttaa. Ulkoiset tekijät ovat asennukseen ja käyttöolosuhteisiin liittyviä tekijöitä, joihin valmistaja ei voi päätöksillään tai toimillaan vaikuttaa. [5, s. 6-10, 44, 47-50; 28, s.76-79; 17, s. 4-7.]

#### 3.1 Ankkuriin liittyvät tekijät

Ankkurointimassan kemiallinen koostumus vaikuttaa ankkurin toimintaan. Cook ja Konz [28] havaitsivat, että liimamassojen ominaisuudet voivat vaihdella eri hartsien välillä, mutta myös samojen kemiallisten ryhmien sisällä. Kemiallisten ankkureiden ominaisuuksia voidaan parantaa kasvattamalla joidenkin täyteaineiden määrää, esimerkiksi ankkurin alttiutta virumalle voidaan vähentää kasvattamalla kuitujen määrää liimamassassa. [18, s. 488.]

Liimamassan komponenttien annostelu oikeassa suhteessa ja niiden riittävä sekoittuminen aikaansaavat lujan sidoksen. Näiden toteutumiseen voidaan vaikuttaa ankkureiden pakkaustavalla, joskin irtotavaran kohdalla vastuu annostelusta on asentajalla. Annostelun tarkkuus työmaalla on todennäköisesti epävarmempaa ja esimerkiksi Florida Department of Transportation (FDOT) sallii vain valmiiksi annosteltujen kemiallisten ankkureiden käytön. [5; 29, s. 1101.]

Ankkurointimassan on annettava kovettua tietty aika ennen kuin sitä voi kuormittaa. Cook ja Konz [28] tutkivat kovettumisajan vaikutusta, ja havaitsivat, että useilla testatuilla ankkureilla lyhennetty kovettumisaika ennen kuormitusta johti heikompaan tartuntalujuuteen. Kokeiden perusteella suositeltiin, että ankkureiden annettaisiin kovettua valmistajan ohjeen lisäksi vielä 24 tuntia ennen kuormituksen aloitusta.

Çolak [18] osoitti tutkimuksensa vetokokeissa, että mitä pienempi etäisyys ankkuritan-  
gon ja betoniin poratun reiän välillä on, sitä pienempi on todennäköisyys virumalle. Krish-  
namurthyn [30] tutkimusten perusteella tällä etäisyydellä ei ollut ankkurin virumisen kan-  
nalta merkitystä, kun kyseessä olivat ankkurit, joilla betoniin poratun reiän ja ankkuritan-  
gon välinen suhde on suuri ( $d_0/d_a$  välillä 1,2...4,1). Täten tämänhetkinen tutkimus ei täy-  
sin riitä selittämään tangon ja reiän seinämän välisen etäisyyden merkitystä.

### 3.2 Asennukseen liittyvät tekijät

Tyypillisiä asennukseen liittyviä tekijöitä, jotka vaikuttavat kiinnityksen kestävyys-  
teen, ovat esimerkiksi asennussuunta, porausmenetelmä, reiän puhdistus, betonin kosteus  
sekä asennuslämpötila. Ankkurivalmistaja määrittelee näihin liittyvät ehdot tuotekohtai-  
sesti, ja ne on otettava ankkurin valinnassa ja asennuksessa huomioon. Myös betonin  
koostumuksella ja siinä käytetyn runkoaineksen koolla on merkitystä. Asennuksen aikai-  
silla virheillä ja huolimattomuudella voi olla merkittävä vaikutus ankkurointijärjestelmän  
toimintaan. Kemiallisten ankkureiden asennustyötä tutkittaessa [31] selvisi, että useassa  
arvioituissa kohteessa asennusta ei tehty ohjeiden mukaisesti. Asentajien tiedoissa  
sekä ankkureiden asennusohjeissa oli lisäksi puutteita. Kemiallisten ankkureiden pettä-  
misestä johtuneiden onnettomuuksien tutkinnassa on myös huomautettu asennusten vir-  
heellisyydestä, ks. kohta 3.6. Ankkurivalmistaja määrittelee sallitut asennussuunnat ja -  
menetelmät tuotekohtaisesti. Näiden ohjeiden lisäksi voi olla muiden tahojen antamia  
määräyksiä tai ohjeita esimerkiksi sallituista asennussuunnista. [5; 28.]

Ankkuria varten betoniin porattava reikä tehdään tyypillisesti poravasaralla tai timantti-  
poralla. Timanttipora jättää reiän seinämät sileämmiksi, millä voi olla vaikutusta ankkurin  
tartuntaan. Timanttiporattuun reikään asennetun ankkurin tartuntalujuus oli tutkimuk-  
sissa vain 74 % iskuporakoneella tehtyyn reikään asennetun ankkurin tartuntalujuu-  
desta. [5, s.8; 32, s.58, 153-162, 285.]

Poratun reiän puhdistuksessa tulee olla erittäin huolellinen. Reiän pohjalle ja seinämiin  
jäänyt betonipöly estää liimamassan tarttumista betoniin. Pölyn vaikutus kemiallisen ank-  
kurin tartuntalujuuteen riippuu ankkurin tyypistä. Testeissä puhdistamattomaan reikään  
asennetun ankkurin keskimääräinen tartuntalujuus oli 71 % ohjeiden mukaisesti puhdis-  
tettuun reikään asennetun ankkurin tartuntalujuudesta [28]. Käytettävät

puhdistusvälineet ja -tavat määritellään ankkurivalmistajan ohjeissa. Yleensä suositellaan harjauksen ja puhallusilman yhdistelmää. Puhdistusvälineiden valinnalla voi myös olla merkitystä tartunnan vahvuuteen. Esimerkiksi Florida Department of Transportation ei suosittele metallisia harjoja käytettäväksi, sillä ne saattavat silottaa reiän seinämiä ja siten heikentää tartuntaa ankkurimassan ja betonipinnan välillä [29].

Asennettavan ankkurin suunnalla voi olla huomattava vaikutus ankkurin toimintaan. Pystysuuntaisista asennuksista erityisesti ylöspäin tehtävät asennukset voivat olla hankalia. Betoniin poratun reiän täyttäminen ankkurointimassalla on haastavaa, koska massa pyrkii valumaan alaspäin. Massaan jäävät raot ja taskut vähentävät tartuntapinta-alaa ja heikentävät siten tartuntalujuutta. Kaikki ankkurit eivät sovellu edellä kuvattuihin asennuksiin, ja esimerkiksi FDOT on sallinut kemiallisten ankkureiden asennukset vain vaakasuunnassa sekä pystysuunnassa alaspäin asennettuna. Myös muissa Yhdysvaltojen osavaltioissa on rajoituksia tieliikenteessä tehtäviin pään yläpuolisiin asennuksiin, joissa ankkuri on käyttönsä aikana vetorasitettu. [5; 29].

Kemiallisten ankkureiden asennus matalissa lämpötiloissa voi johtaa siihen, että massa ei kovetu täydellisesti, jolloin ankkurin tartuntalujuus erityisesti pitkäaikaiskuormitettuna jää heikommaksi kuin normaalilämpötilassa asennetun ankkurin lujuus. Asennuksen aikainen kosteus voi estää ankkurointimassan pääsyn ja tarttumisen betonin huokosiin, jolloin betonin ja liimamassan välinen tartunta jää heikommaksi kuin kuivissa oloissa asennetun ankkurin. Kosteus voi myös häiritä kemiallista ankkurin komponenttien välistä kemiallista reaktiota. Märän betonin tai vedellä täyttyneen reiän vaikutus ankkurin toimintaan on tuotekohtaista, ja ankkurin soveltuvuuden kyseisiin olosuhteisiin määrittelee sen valmistaja. [5, s. 6-10, 47-48; 28, s. 78-79; 4.]

### 3.3 Betoniin liittyvät tekijät

Betoniin liittyvistä tekijöistä betonin runkoaineuksen koolla ja karkeudella on huomattu kokeiden perusteella olevan vaikutus ankkurin tartuntalujuuteen [15]. Cook ja Konz [28] tutkivat betonin puristuslujuuden merkitystä ankkurin tartuntalujuuteen. Kokeissa ankkurit antoivat hyvin erilaisia tuloksia, jonka vuoksi betonin puristuslujuuden vaikutus tulisi selvittää ankkurikohtaisesti. Halkeilleen betonin vaikutus tartuntalujuuteen on merkittävä, sillä halkeamat voivat rikkoa sidoksen betonin ja ankkurimassan välillä. [33; 34.]

### 3.4 Käyttöolosuhteisiin liittyvät tekijät

Käyttöolosuhteisiin liittyviä tekijöitä ovat esimerkiksi käyttöiän aikainen lämpötila, kosteus, pitkäaikaiskuormitus sekä jäätyminen ja sulaminen. Näistä tekijöistä erityisesti käyttöiän aikainen korotettu lämpötila sekä kosteus voivat kasvattaa ankkurin virumaa. [35.]

Ankkurin altistuminen ulkoilman olosuhteista johtuvalle jäätymiselle ja sulamiselle voi johtaa ankkurointimassan laajenemiseen ja kutistumiseen, joka mahdollisesti rikkoo sidoksen ankkurin ja betonin välillä. Myös ulkona olevan ankkurin läheisyydessä olevan veden laajentuminen jäätyessään voi rikkoa tartunnan ankkurin ja betonin välillä [5, s. 6-7]. Elfgrén ja muut [36; 37] sekä Nilforoush [11] analysoivat tuloksia rasisuskokeista, joissa tutkittiin kemiallisten ankkureiden kestävyyttä pitkäaikaiskuormitettuna, ja ulkona sijainneet vetorasitetut ankkurit pettivät keväällä ensimmäisen talven jälkeen.

### 3.5 Korotettu lämpötila ja pysyvä kuormitus

Lämpötilan vaikutukset voivat alkaa jo ankkurin varastoinnin aikana, jolloin valmistajan määrittelemästä lämpötilasta poikkeaminen voi lyhentää kemiallisen ankkurin säilyvyysaikaa. Asennuksen aikainen lämpötila vaikuttaa kemiallisen ankkurin kovettumiseen. Ankkurin käyttöiän aikaiset lämpötilat ja niiden vaihtelut määrittelevät osaltaan kemiallisten ankkureiden kestävyyttä. Käyttöiän aikainen korotettu lämpötila on tämän työn kannalta oleellisin, ja se voi muuttaa kemiallisen ankkurin tartuntalujuutta merkittävästi ja siten vaikuttaa sen kykyyn kestää pitkäaikaiskuormia.

Polymeeripohjaiset ankkurointimassat ovat herkkiä korkeille lämpötiloille. Hartsien taipumus muodonmuutoksiin pysyvästi kuormitettuna kasvaa, kun kuormitukseen yhdistetään korkea lämpötila. Messlerin mukaan kemiallisten ankkureiden suurin heikkous on niiden rajattu kyky sietää korkeita lämpötiloja [38]. Lämpötilalla tarkoitetaan tässä yhteydessä ankkuria ympäröivän betonirakenteen lämpötilaa. Korotettu lämpötila voi vaikuttaa rakenteeseen lyhytaikaisesti lämpötilavaihtelujen seurauksena tai pitkäkestoisesti. Jatkuva korkea lämpötila on kemiallisten ankkureiden kannalta vaarallisin, ja pitkäaikaiskuormituksen ja korkean lämpötilan yhdistelmä vaikuttaa merkittävästi kemiallisen ankkurin käyttöikänsä. [10; 7; 39.]



Korotettu lämpötila muuttaa kemiallisen ankkurijärjestelmän mekaanisia ominaisuuksia, heikentää sen vetolujuutta ja kasvattaa virumaa. Korkean lämpötilan aikaansaama hartsin pehmeneminen vähentää tartuntaa betonin ja ankkurointimassan välillä ja vaikuttaa siten myös tartuntalujuuteen. Sementtipohjaiset ankkurointi- ja jälkivalumassat eivät ole yhtä herkkiä korkeille lämpötiloille kuin orgaaniset polymeeripohjaiset ankkurointimassat. Polymeerin lämpötilaherkkyys määräytyy sen lasittumislämpötilan (engl. glass transition temperature) ja taipumislämpötilan (engl. heat deflection temperature, HDT) mukaan. Lasittumislämpötilan läheisyydessä polymeerin mekaaniset ominaisuudet muuttuvat merkittävästi. Hartsit pehmenevät ja muuttuvat kumimaisiksi, kun lämpötila ylittää niiden lasittumislämpötilan. Samalla niiden tartuntalujuus heikkenee. Lasittumislämpötiloissa voi olla suuriakin eroja eri tuotteiden välillä. Taipumislämpötilassa polymeeri muuttaa muotoaan kuormitettuna, eli se määrittää muovien rasituksen kestoa korkeissa lämpötiloissa. [5; 7; 24; 40; 13; 38.]

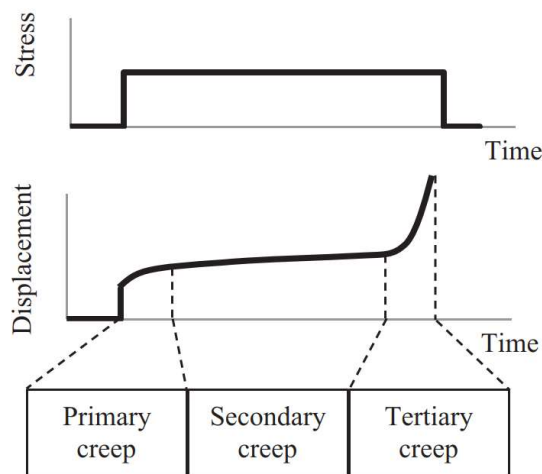
Hartsien viskoelastisen käytöksen takia on kemiallisten ankkureiden suunnittelussa oltava huolellinen ankkurin käyttölämpötilaa määriteltäessä. Usein pitkäaikaisen maksimilämpötilan määrittäminen voi olla vaikeaa. Jos betonirakenteen lämpötila on korkea viikkoja tai kuukausia, tulisi sitä pitää pitkäaikaisena. Mikäli ankkurin oletetaan voivan olla korkeassa lämpötilassa pitkäaikaikuormitettuna merkittävän osan sen käyttöiästään, tulisi ankkuri testata sen pitkäaikaisessa maksimilämpötilassa. [10; 24.]

Feng ja muut [41] suorittivat vetokokeita tartunta-ankkureille, ja tulokset osoittivat hartsien mekaanisten ominaisuuksien heikentyvän merkittävästi koelämpötiloja nostettaessa.

### 3.5.1 Viruma

Viruminen tarkoittaa materiaalin palautumatonta muodonmuutosta, joka tapahtuu hitaasti ja on ajasta riippuvaista. Pitkäaikaisrasitettu kemiallinen ankkuri on viskoelastisten ominaisuuksiensa takia altis virumalle, joka aiheuttaa muodonmuutoksia ja siirtymiä. Nämä viruman aiheuttamat muodonmuutokset ovat epälineaarisia, ja ne ovat riippuvaisia sekä jännityksen suuruudesta että kestosta ja materiaalin iästä ja sen vaurioista. Jos lämpötila nousee 10 °C pitkäaikaikuormitetun kemiallisen ankkurin HDT-lämpötilan yläpuolelle, ovat viruman aiheuttamat muodonmuutokset jo merkittävän suuria. [11, s. 4; 12, s. 458-460; 13.]

Viruma voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen: primäärinen viruma, sekundäärinen viruma ja tertiäärinen viruma (Kuva 9). Viruman ensimmäinen vaihe on lyhyt ja epälineaarinen. Toinen vaihe on pitkäkestoinen, ja myös parhaiten tunnettu. Se on yleensä monen tutkimuksen kriittisin osa. Viruman kolmannessa vaiheessa muodonmuutokset alkavat kasvaa voimakkaasti ja sitä seuraa yleensä murtuminen. Tämä murtuminen voi johtaa joissain tapauksissa rakenteen äkilliseen romahdukseen. Viruminen ja siitä johtuvat muodonmuutokset ja siirtymät eivät tapahdu nopeasti, vaan virumaa voi kuvata hitaana rakenteen vaurioitumisena. [11, s. 4, 12, s. 458-460; 42, s.958.]



Kuva 9. Viruman vaiheet kuvattuna. [12, s. 459.]

Arviointimenetelmät, joilla ankkureiden suorituskykyä selvitetään, sisältävät myös viruman huomioon ottavia testejä. Nämä ovat kokeita, joissa kemiallista ankkuria kuormitetaan tietyn ajanjakson verran tietyllä prosenttiosuudella sen kokonaiskapasiteetista. Kokeen aikana rekisteröidään vaadittu määrä ankkurin siirtymän arvoja, joiden perusteella voidaan ekstrapoloida ankkurin siirtymät eri tulevaisuuden hetkillä. Ankkurin kuormitus näissä testeissä on yleensä verrattain alhaisella tasolla, vain 30-50% sen lyhytkestoisesta kapasiteetista, jolloin murtumista ei tapahdu kokeen aikana. [42, s. 957-959.]

Ekstrapoloinnissa tällä hetkellä käytettäviä matemaattisia menetelmiä ovat ns. Logarithmic model ja ns. Findley Power Law. Lisäksi Bostonissa tapahtuneen tunnelionnettomuuden jälkeen on esitetty kolmatta, ns. Polynomial model -menetelmää [43, s.16-17, 47].

Kuormituskokeissa mitatut siirtymän arvot ekstrapoloidaan käyttämällä Findley Power Law -menetelmää

$$\delta(t) = \delta_0 + a \cdot t^b$$

jossa  $a$  ja  $b$  ovat vakioita ja  $\delta_0$  on alkuperäinen siirtymä pitkäaikaiskuormituksen vaikutuksesta ajan hetkellä  $t=0$ . [2.]

Tartunta-ankkureiden kestävyyttä arvioidaan lyhytaikaisten kuormituskokeiden perusteella, joista saatavat siirtymäarvot ekstrapoloidaan vastaamaan tietyllä tulevaisuuden hetkellä tapahtunutta ankkurin siirtymää. Jos tuloksena saatu siirtymä on pienempi kuin raja-arvo, on ankkuri läpäissyt testin hyväksytysti. Jos ei, täytyy koe suorittaa uudelleen pienemmällä parametreillä, kuten pienemmällä kuormituksella tai alhaisemmassa lämpötilassa. Tulokset ekstrapoloidaan 10 vuoden päähän, kun ankkurin suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta.

Siirtymällä tarkoitetaan EN 1992-4 määritelmän mukaan ankkurin kuormitetun pään liikettä kuormitussuunnassa suhteessa betoniin, johon se on asennettu [9, s. 13]. Euroopan ja Yhdysvaltojen eri standardit poikkeavat toisistaan hieman sen osalta, kuinka pitkiä suoritettavat kokeet ovat kestoiltaan, sekä mitä menetelmää ekstrapoloinnissa käytetään. Yllä kerrottu arviointitapa perustuu oletuksille, joiden mukaan jännitykset jakautuvat tasaisesti ankkurin matkalla, viruma kohdistuu ankkurointimassaan eikä betonin virumaa oteta huomioon.

Ankkureiden suunnittelua ohjaaviin dokumentteihin on viime vuosina tehtyjen tutkimusten tulosten perusteella lisätty erilaisia vähennyskertoimia, joissain pitkäaikaiskuormitukseen liittyvissä tilanteissa. [5.]

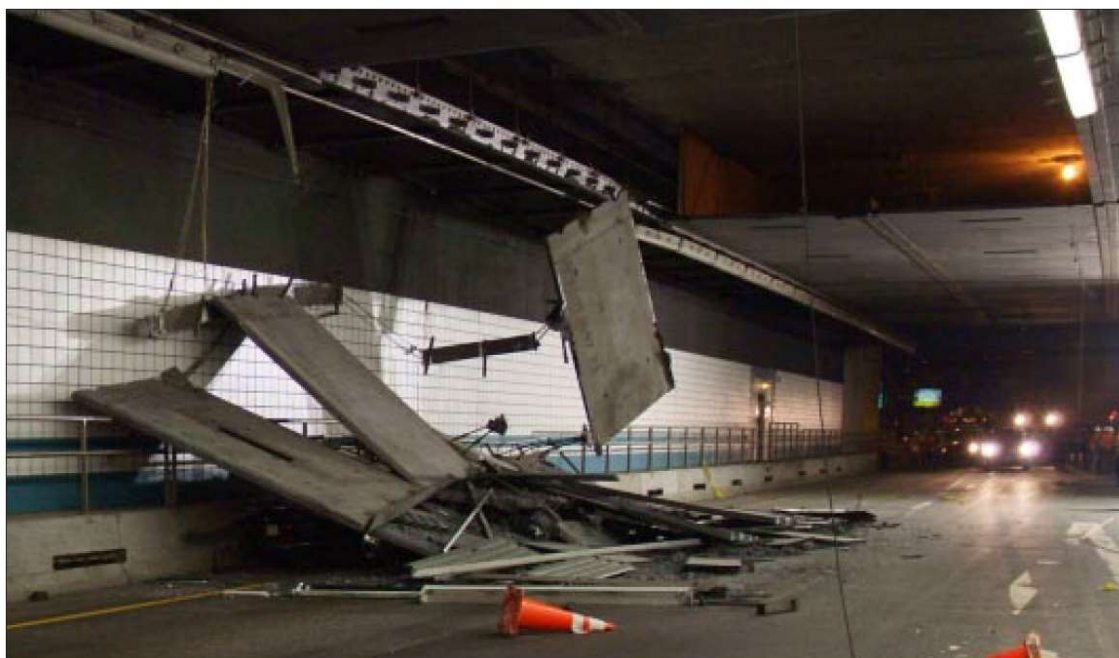
### 3.6 Onnettomuudet

Kemiallisia ankkureita on tutkittu ja niiden toimintaa erilaisissa olosuhteissa selvitetty erityisesti 2000-luvulla sattuneiden onnettomuuksien seurauksena. Tieto suurimmista onnettomuuksista on levinnyt maailmanlaajuisesti ja saanut monen organisaation tarkentamaan hyväksyntäkriteerejään ja standardejaan. Useassa onnettomuustapauksessa

kyse on ollut pitkäaikaiskuormitetusta ankkurista ja viruman aiheuttamasta ankkurin pettämisestä. Lämpötilan ei alla mainituissa tapauksissa tiedetä vaikuttaneen onnettomuuden syntymiseen.

#### Big Dig -tunnelin onnettomuus, 2006

Yhdysvalloissa Bostonissa niin kutsutussa Big Dig -tunnelissa yhteensä noin 26 tonnia tunnelin katon betonielementtejä ja niitä kannattaneita rakenteita romahti heinäkuussa 2006 (Kuva 10). Onnettomuudessa kuoli yksi henkilö. Elementit oli kiinnitetty tunnelin kattoon kemiallisilla ankkureilla, ja ne olivat olleet pysyvästi vetorasitettuja asennuksen jälkeen, onnettomuuteen mennessä yhteensä hieman yli seitsemän vuoden ajan. Romahdus johtui näiden elementtejä kannattaneiden kemiallisten ankkureiden pettämisestä.



Kuva 10. Osa Big Dig -tunnelin katon betonielementeistä romahti alas kemiallisten ankkureiden petettyä. [23, s.1.]

Tutkimuksissa todettiin, että käytetyt ankkurit eivät olleet soveltuvia kyseisiin olosuhteisiin, sillä niitä ei ollut tarkoitettu käytettäväksi kiinnityksissä, joissa ne joutuvat pysyvästi kuormitetuiksi. Onnettomuuden syyksi määriteltiin suunnittelutyön puutteellisuus, sillä ankkurin alttiutta virumalle ei osattu huomioida suunnittelussa, sekä ankkurivalmistajan

virhettä siinä, ettei se tuonut selvästi ilmi kohteeseen valitun ankkurin kuormitusta koskevia rajoituksia. Käytön aikaisten tarkastusten puutteellisuus esti virheen huomaamisen ja siihen puuttumisen ennen rakenteiden romahdusta. [23.]

Onnettomuusraportissa huomautettiin myös siitä, että ankkureiden asennus työmaalla oli todennäköisesti ollut virheellistä tai puutteellista, mutta todettiin myös, etteivät tapahtuneet asennusvirheet yksinään olisi voineet aiheuttaa onnettomuutta. Onnettomuuden jälkeisissä tarkastuksissa havaittiin usean ankkurin siirtyneen paikoiltaan, ja moni niistä oli vaarassa irrota kokonaan (Kuva 11).

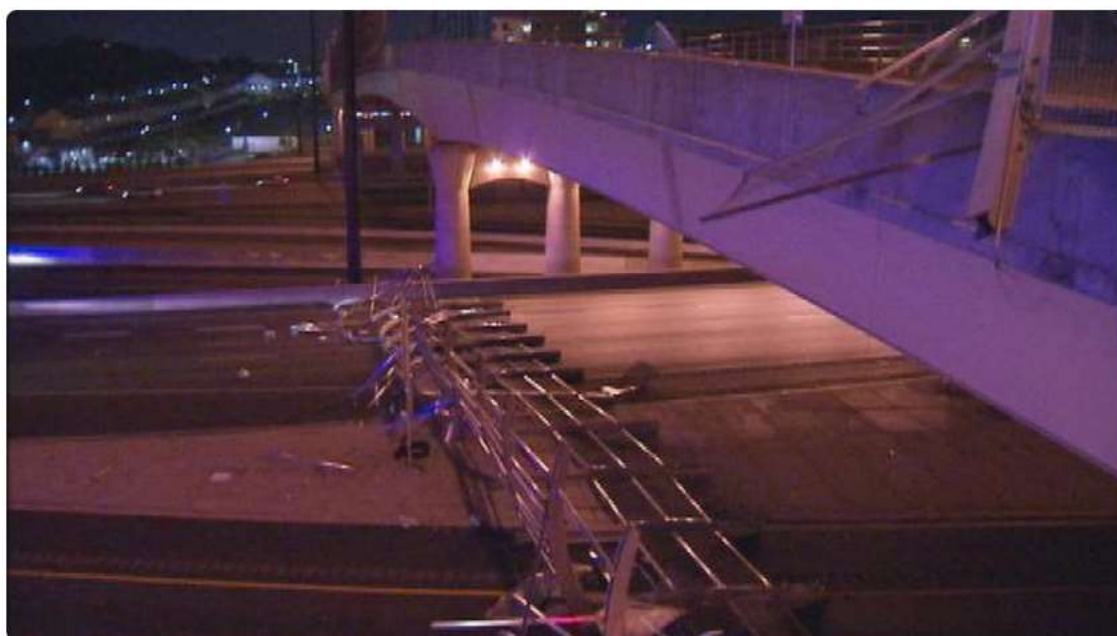
Onnettomuustutkinnassa ja rakennetarkastuksissa havaittujen turvallisuusriskien seurauksena osa betonielementeistä koostuvasta kattorakenteesta purettiin kokonaan pois, ja jäljelle jätetyn osan kemialliset ankkurit korvattiin mekaanisilla ankkureilla. Onnettomuustutkintaraportissa mainitaan yhtenä turvallisuusriskinä puutteet kemiallisten ankkureiden testauksessa pitkäaikaiskuormitettuna, sekä vähäinen tietämys kemiallisten ankkureiden toiminnasta ja käyttäytymisestä eri olosuhteissa. Tämän jälkeen ankkureiden arviointia sekä suunnittelua koskevia standardeja on päivitetty ja kehitetty. [23.]



Kuva 11. Kuvassa näkyy selvästi Big Dig -tunnelin kattoelementtejä kannatelleiden kemiallisten ankkureiden tartunnan peittäminen ja ankkureiden siirtymät. [23, s.12.]

### Atlantassa romahtanut sillan kaide, 2011

Atlantassa romahti elokuussa 2011 sillan kaiderakenne, joka oli kiinnitetty kemiallisilla ankkureilla (Kuva 12). Kaide oli rakennettu vuonna 2004, ja sen kiinnitykseen käytetyt ankkurit pettivät siis noin 7 vuoden kuluttua asennuksesta. Syyksi todettiin käytettyjen epoksipohjaisten kemiallisten ankkureiden huono kestävyys pysyvästi kuormitettuna sekä puutteet asennustyössä. Kemiallisen ankkurointimassan komponenttien sekoituksessa oli epäonnistuttu, ja massaan oli jäänyt ilmataskuja. Onnettomuuteen johtaneiden syiden todettiin olevan hyvin samankaltaiset kuin Bostonissa tapahtuneessa Big Dig -tunnelin onnettomuudessa. [44.]



Kuva 12. Kaide romahti Atlantassa, kun sitä kannattaneet kemialliset ankkurit pettivät. [44.]

### Balcombe-tunnelissa romahtaneet teräspalkit, 2011

Iso-Britanniassa, Sussexissa Balcombe-rautatietunnelissa tasoa kannattavien teräspalkkien kiinnitys petti syyskuussa 2011. Tunnelin katon läheisyydessä sijainnutta tasorakennelmaa kannattelevat palkit oli kiinnitetty tunnelin tiiliseinään kemiallisilla ankkureilla. Neljän palkin toisen pään kiinnitys petti ja taso jäi roikkumaan raiteiden ylle. Kuukaan ei loukkaantunut. Tutkimuksissa havaittiin, että kohteen kemialliset ankkurit eivät

soveltuneet tunnelissa käytettyihin tiliin, ja tartunta niiden välillä oli jäänyt heikoksi. Myös asennuksessa oli tehty virheitä. Tutkimuksissa epäiltiin myös tunnelissa olleen kosteuden vaikuttaneen epäsuotuisasti ankkureihin. Tapahtuman jälkeen suoritettussa tarkastuksessa havaittiin, että osa ankkureista oli kokonaan irronnut ja kateissa, ja osa paikallaan vielä olevista ankkureista oli irrallaan (Kuva 13). [45; 46.]

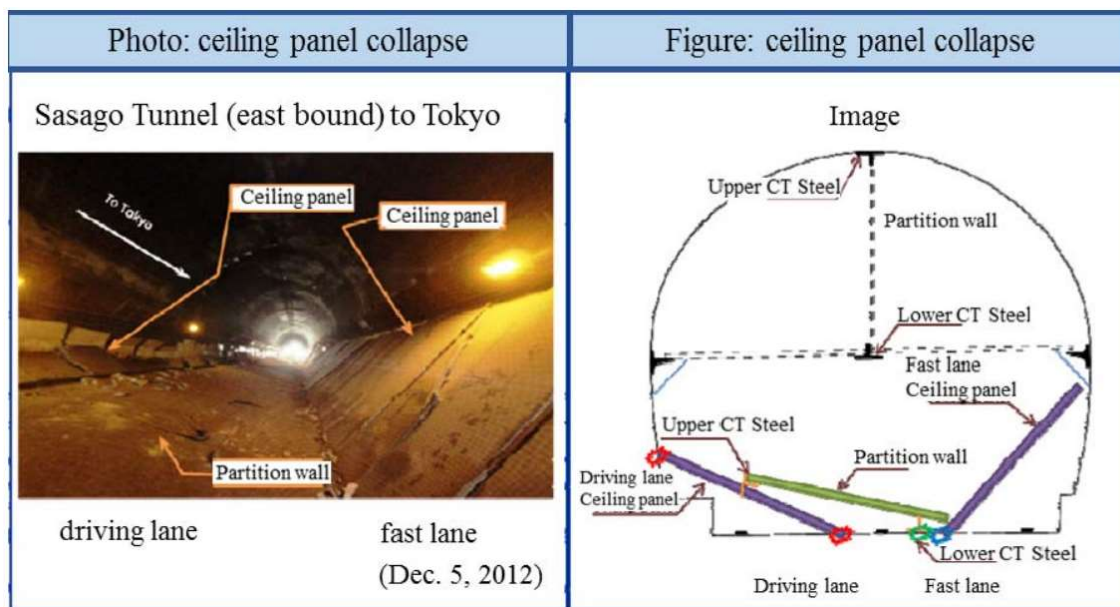


Kuva 13. Tarkastuksessa löydetty irtonainen ankkuri onnettomuuspaikan lähellä. [46.]

### Sasago-tunnelin onnettomuus, 2012

Japanissa Sasago-tunnelissa tapahtui onnettomuus, jossa tunnelin katto romahti noin 140 metrin matkalta vuonna 2012 (Kuva 14). Tapahtumassa kuoli 9 ihmistä. Tunneli ehti olla käytössä 35 vuotta. Tässäkin tapauksessa betonielementtejä oli rokotettu katosta kemiallisten ankkureiden varassa, ja ankkureiden pettäessä 500 tonnia betonia romahti alas. Onnettomuuden tutkinnassa havaittiin, että ankkureille oli todellisuudessa aiheutunut merkittävästi suurempia kuormia kuin mitä suunnitelmissa oli osattu huomioida, ja valitut ankkurit olivat siten alimitoitettuja niille kohdistuneelle vetorasitukselle. Myös ankkureiden asennuksessa oli tapahtunut merkittäviä virheitä. [47.]

Osana onnettomuustutkintaa sattumanvaraisille 44 ankkureille suoritettiin vetokokeita, joiden tuloksena saadut lujuusarvot olivat 16 ankkurin kohdalla huomattavasti alle ankkureille aluksi laskettujen kuormien. Vetokokeissa havaittiin, että tartunta ankkurointimassan ja teräsankkurin väliltä puuttui kokonaan joistain kohdista kokonaan. Tutkimuksissa havaittiin myös betoniin porattujen reikien läheisyydessä halkeamia, joihin epoksi oli päässyt siirtymään.



Kuva 14. Sasago-tunnelin katon betonielementtejä romahti alas noin 140 metrin matkalla vuonna 2012. [47, s.2.]

Tapahtuman seurauksena suositeltiin mahdollisuuksien mukaan kokonaan poistamaan kemiallisilla ankkureilla kannatellut kattoelementit tunneleista sekä toistaiseksi välttämään kemiallisten ankkureiden käyttöä kohteissa, joissa ne ovat alttiina jatkuvalle veto- rasitukselle. Myös tarkastuksia suositeltiin lisäämään kohteissa, joissa kemiallisia ankkureita on käytetty. [47.]

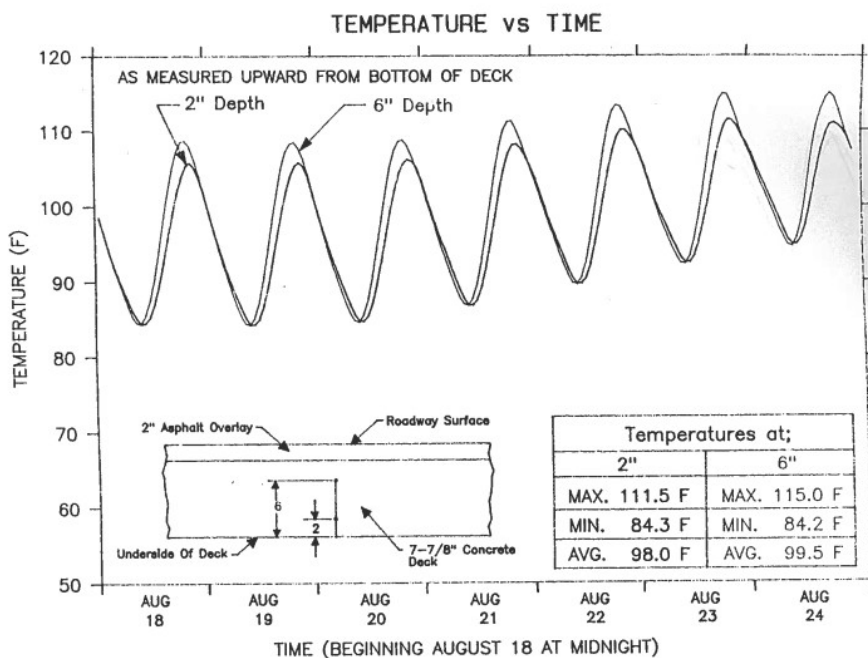


## 4 Merkittäviä aiheeseen liittyviä tutkimushankkeita

### 4.1 Dusel & Mir

Dusel ja Mir [48; 49] suorittivat tutkimuksia California Department of Transportationin (CALTRANS) toimeksiannosta. Ensimmäinen osa tutkimuksesta, Initial Evaluation of Epoxy Cartridges used for Anchoring Dowels into Hardened Concrete valmistui vuonna 1991. Raportin liite C käsittelee tutkimusta sillan kannen lämpötilasta ja sen vaihtelusta kesäkuukausina. Näiden mittausten tuloksia käytetään tänäkin päivänä eri standardeissa korkeiden lämpötilojen määrittelyssä myös Euroopassa. Lopullinen tutkimusraportti, Evaluation of New Bonding Materials for Anchoring Dowels in Existing Concrete julkaistiin vuonna 1993.

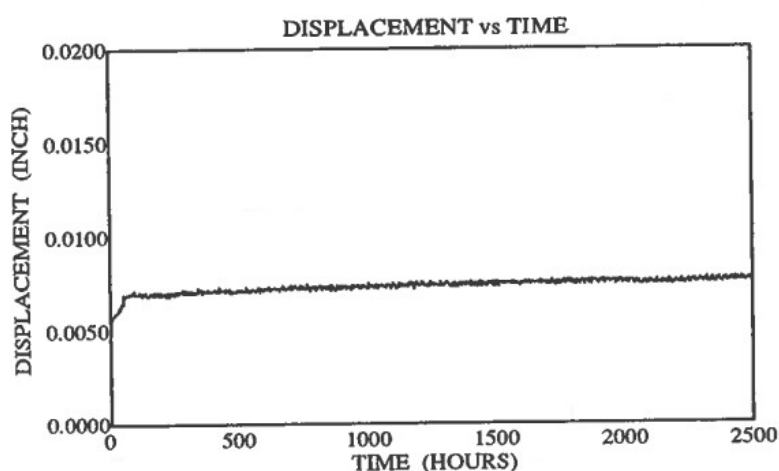
Tutkimusten tarkoituksena oli määrittää epoksipohjaisten kemiallisten ankkureiden materiaaliominaisuuksia sekä selvittää ankkureiden alttiutta virumalle sekä virumasta johtuvien muodonmuutosten suuruutta, kun ankkuri on vetorasitettu pitkäaikaisesti 43 °C:n lämpötilassa. Samassa yhteydessä he selvittivät betonirakenteiden sisästä lämpötilaa ja sen vaihtelua aavikolla, Kaliforniassa Barstowin lähellä sijaitsevalla Pisgahin sillalla.



Kuva 15. Sillan betonikannen korkein mitattu lämpötila 24.8. [48, Appendix C, Figure 4.]

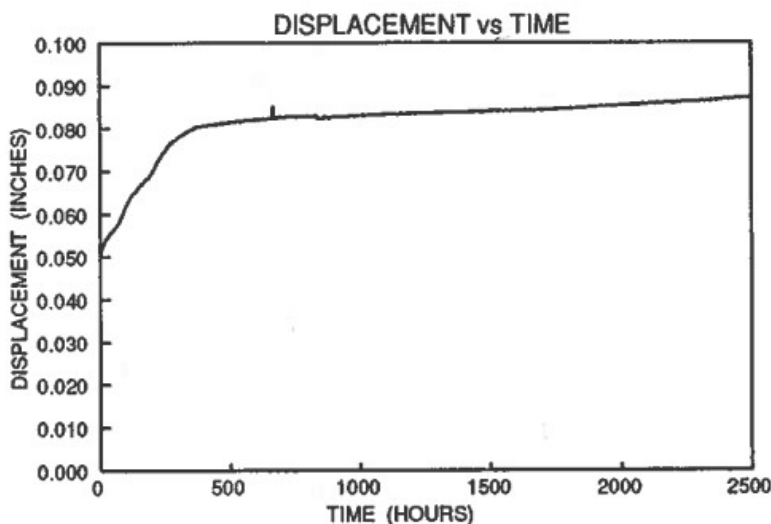
Vuonna 1991 Dusel & Mir raportoivat, että suurin osa testatuista kemiallisista ankkureista osoitti 43 °C:n lämpötilassa merkittävää virumaa. Muodonmuutokset alkoivat jo hyvin pian kuormituksen alkamisen jälkeen.

Sillan lämpötilavaihteluita tutkittiin, sillä huomattiin lämpötilavaihteluiden, ja erityisesti korkeiden lämpötilojen, olevan kriittisiä kemiallisten ankkureiden viruman suuruuden kannalta. Korotettu lämpötila kasvatti virumaa kokeissa huomattavasti. Tarkoituksena oli selvittää todellisia maksimilämpötiloja siltarakenteisiin tehtävien kiinnitysten suunnitteli-joita varten. Tutkimuksissa selvisi, että ulkona sijaitsevan betonirakenteen sisäinen lämpötila Kaliforniassa voi olla hyvinkin korkea kesäkuukausina.



Kuva 16. Portlandsementillä jälkivaletun ankkurin siirtymä korotetussa lämpötilassa. [49.]

Lämpötiloja mitattiin 6.8.-12.9.1991 välisenä aikana. Korkein mitattu ilmanlämpötila, 42,67 °C (108,8 °F), oli välillä 18.-24.8. Korkein mitattu betonirakenteen sisäinen lämpötila oli 46,1 °C (115 °F), ja se mitattiin 24.8 (Kuva 15). Korkein lämpötila mitattiin 15,24 cm eli 6" syvyydessä. Betonirakenteen keskimääräinen sisäinen lämpötila kaikissa mittauskohdissa oli suurempi kuin keskimääräinen ympäröivä ilmanlämpötila. Rakenteen sisällä vallitseva maksimilämpötila oli kaikissa mittauskohdissa yhtä suuri tai suurempi kuin ympäröivän ilman lämpötila. Rakenteen sisäisen lämpötilan katsottiin voivan nousta aurin- gon säteilyn vaikutuksesta korkeammaksi kuin rakennetta ympäröivän ilman lämpötila on kyseisellä hetkellä.

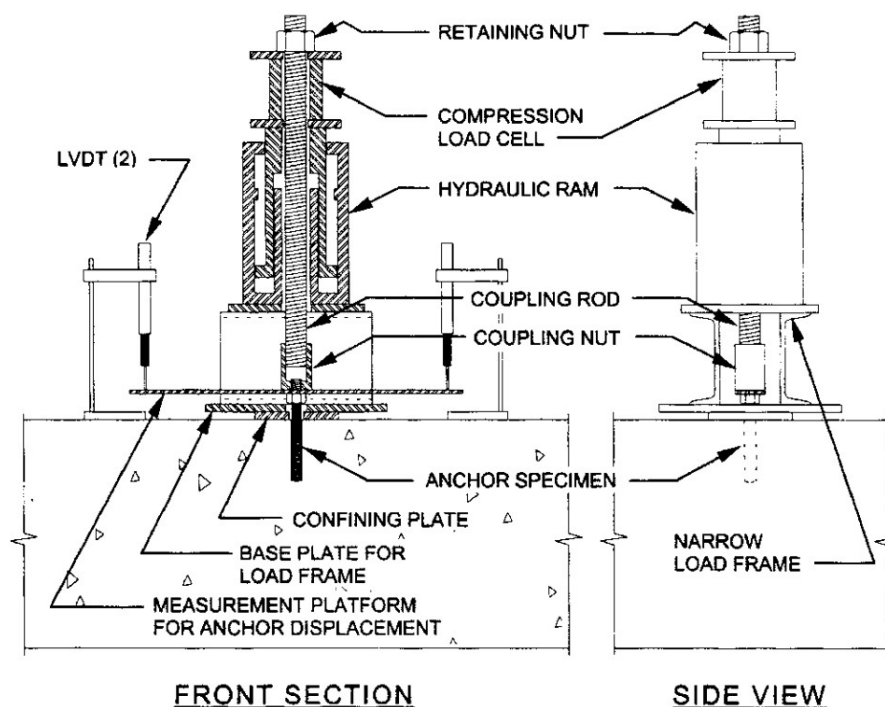


Kuva 17. Polyesteripohjaisen kemiallisen ankkurin siirtymä korotetussa lämpötilassa. [49.]

Ankkureille suoritettuja kokeita jatkettiin ja lisäksi selvitettiin eri tekijöiden vaikutusta ankkureiden lujuuteen. Kokeissa tutkittiin myös muita kuin hartsipohjaisia kemiallisia ankkureita. Portlandsementillä valetun ankkurin siirtymät olivat pienempiä kuin polyesteripohjaisen kemiallisen ankkurin siirtymät (Kuva 16 ja Kuva 17). Tuloksia analysoitiin vuonna 1993 julkaistussa lopullisessa tutkimusraportissa ja myös tämän tutkimuksen tulos osoitti hartsipohjaisten kemiallisten ankkureiden olevan herkkiä korkeille lämpötiloille, ja niitä suositeltiin käytettäväksi vain merkitykseltään vähäisiin asennuksiin.

#### 4.2 Cook & Konz

Cook ja Konz [28] selvittivät erilaisten asennus- ja käyttöolosuhteiden vaikutusta kemiallisiin ankkureihin vuonna 2001 julkaistussa tutkimuksessaan Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors. He suorittivat yhteensä 765 koetta 20 eri ankkurille. Kokeissa käytetty testauslaite on esitetty kuvassa alla (Kuva 18). Tutkittuja olosuhteita, jotka liittyivät betoniin porattuun reikään ja ankkurin asennukseen, olivat ankkurin asennus kosteaan reikään, vedellä täytettyyn reikään sekä puhdistamattomaan reikään. Lisäksi selvitettiin betonin puristuslujuuden ja betonin koostumuksen vaikutusta kemiallisiin ankkureihin. Käyttöolosuhteisiin liittyviä tutkittuja tekijöitä olivat ankkureiden kuormitus ennen kuin ankkurointimassa on täysin kovettunut sekä korotettu lämpötila (43 °C).



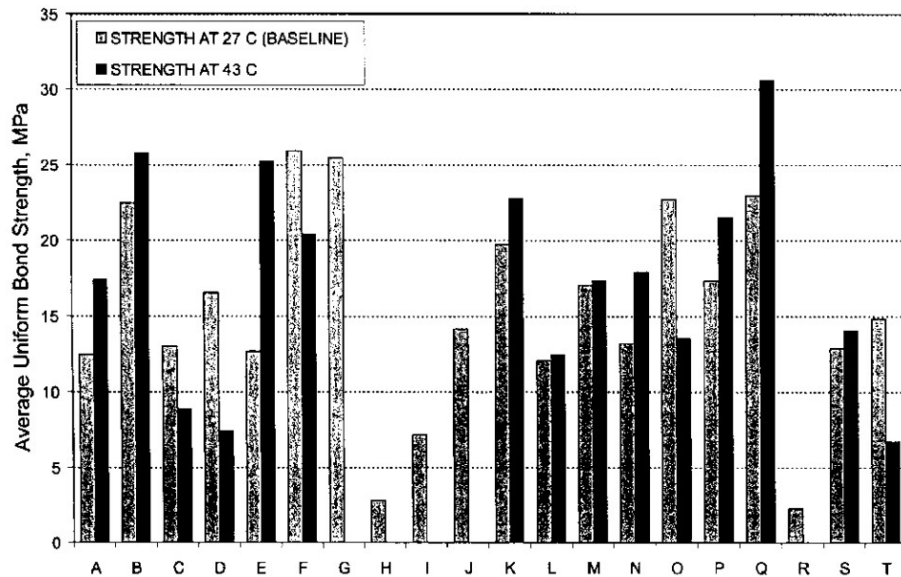
Kuva 18. Rasituskokeissa käytetty testauslaite. [28, s.77.]

Ankkureiden tartuntalujuuden keskimääräiseksi lähtöarvoksi saatiin 15,4 MPa. Arvot vaihtelivat ankkurista riippuen välillä 2,2...25,9 MPa. Kosteaan reikään asennetun ankkurin tartuntalujuus oli keskimäärin 77 % vertailuarvosta, ja märkään reikään asennetun ankkurin lujuus 43 % vertailuarvosta. Korotetun lämpötilan vaikutusta tartuntalujuuteen tutkittiin yhteensä 15 ankkurin kohdalla (Kuva 19). Tulosten perusteella vaikutti, että korkeassa lämpötilassa (43 °C) ankkureiden tartuntalujuus parani keskimäärin 5 % verrattuna 27 °C:ssa suoritetuista kokeista saatuihin vertailuarvoihin. Joidenkin tuotteiden kohdalla lujuus kuitenkin väheni merkittävästi korkeassa lämpötilassa.

Ankkureita arvioitaessa tulisi lujuuden lisäksi kiinnittää huomiota myös vaihteluun koetuloissa. Kaikkien Cook & Konzin tutkimien olosuhteiden tuloksissa esiintyi vaihtelua, mutta erityisesti betoniin porattuun reikään sekä korotettuun lämpötilaan liittyvissä kokeissa keskiarvoon suhteutettu hajonta oli suurta, jopa yli 20 %.

Ankkurointimassojen välisessä vertailussa todettiin epoksipohjaisten massojen tartuntalujuuden olevan yli kaksinkertainen esteripohjaisiin massoihin verrattuna. Lisäksi epoksipohjaisten tuotteiden välinen variaatio tuloksissa oli hieman pienempi kuin

esteripohjaisilla tuotteilla. Eri ankkurituotteiden tartuntalujuus vaihteli kokeissa kuitenkin suuresti riippumatta massan kemiallisesta koostumuksesta.

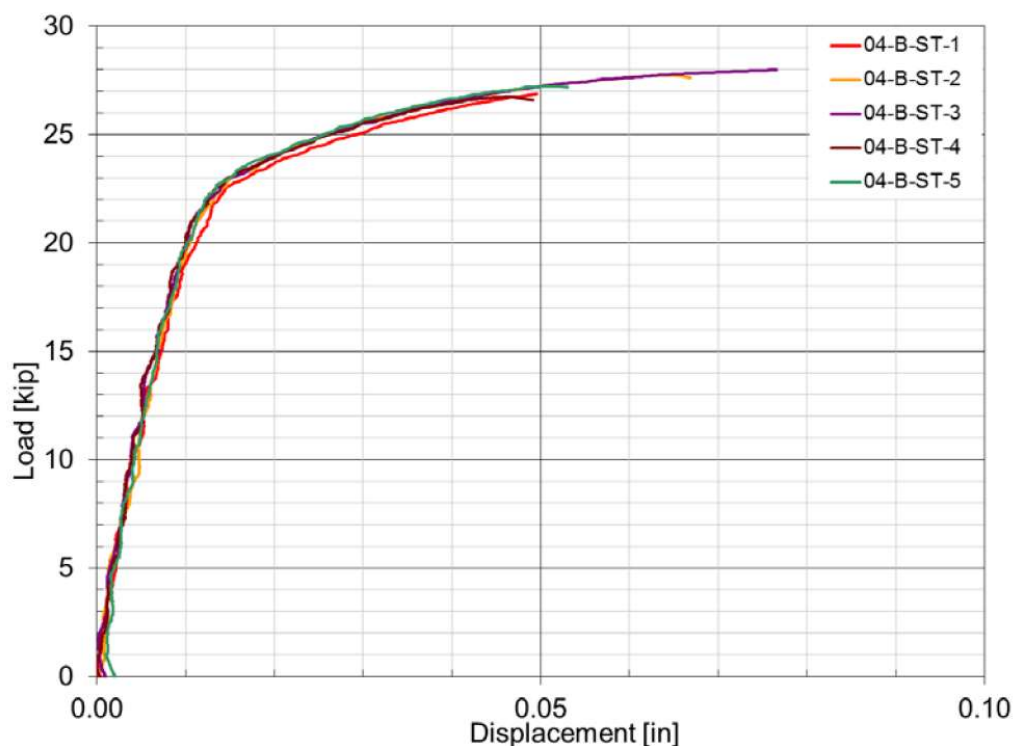


Kuva 19. Tulokset sekä 27 °C että 43 °C lämpötilassa kuormitettujen ankkureiden tartuntalujuuksista Cook & Konzin suorittamissa kokeissa. [28, s. 83.]

#### 4.3 Davis

Davis [32] tutki useiden asennuksen aikaisten olosuhteiden sekä käyttöolosuhteiden vaikutusta pitkäaikaiskuormitettujen tartunta-ankkureiden suorituskykyyn. Hänen väitöskirjansa *Sustained Load Performance of Adhesive Anchor Systems in Concrete* julkaistiin vuonna 2012. Ennen kokeiden alkamista tutkittavat tekijät jaettiin kolmeen prioriteetti-luokkaan sen perusteella, kuinka merkittäväksi niiden vaikutus arvioitiin. Korkean prioriteetin tekijöitä olivat esimerkiksi korotettu lämpötila, kosteus sekä ankkurointimassan tyyppi. Näillä arveltiin olevan suurin vaikutus tartunta-ankkurin kestävyyspitkää aikaiskuormitettuna, ja niiden tutkimista pidettiin siksi tärkeimpänä. Tekijät, joilla arveltiin olevan jotain vaikutusta, luokiteltiin keskitärkeisiin tekijöihin, kuten esimerkiksi asennuslämpötila. Matalan prioriteetin tekijöitä ei testattu, sillä niillä ei arvioitu olevan vaikutusta ankkurin kestävyyspitkää aikaiskuormitettuna. Näitä tekijöitä olivat esimerkiksi ankkurointimassan sisältämät kuidut sekä matala käyttölämpötila.

Ankkureille suoritetuista vetokokeista huomattiin, että yleisimmät murtumistavat olivat tartunnan menetys betonin ja ankkurointimassan välillä sekä leikkausmurto ankkuritan-  
gon kierteissä. Mahdollista halkeilua ankkurointimassassa tutkittiin röntgenin avulla, mutta halkeamia ei ainakaan tällä menetelmällä havaittu muodostuneen tutkituissa näyt-  
teissä.



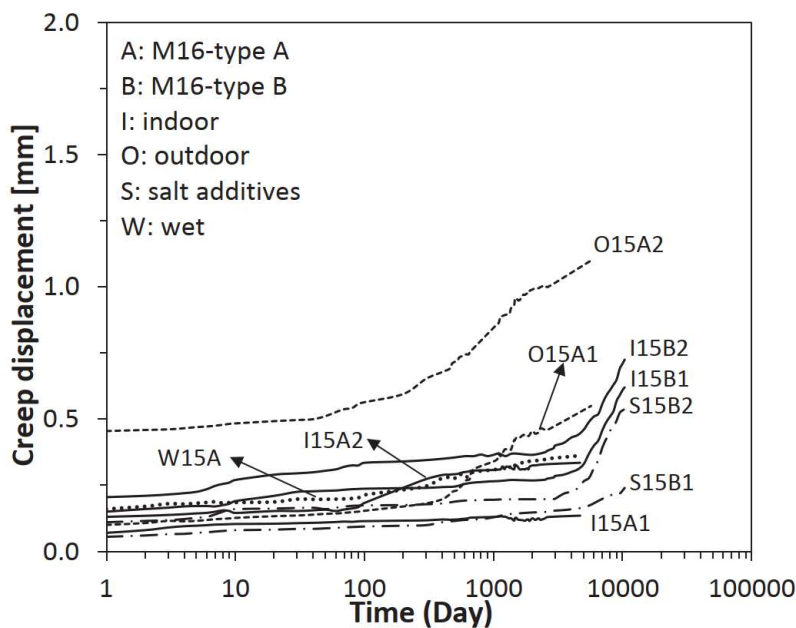
Kuva 20. Erään Davisin suorittaman koesarjan tulokset. Kuvaajalla lyhytaikainen kuorma vs. siirtymä, lämpötila 70 °F eli 21,1 °C. [32, s.443.]

Vetokokeista saatuja tuloksia arvioitiin Stress versus Time-to-Failure -lähestymistavan avulla, mikä on AASHTOn standardeissa käytettyarviointitapa. Ankkurointimassojen viskoelastisia ominaisuuksia tutkittiin erillisillä rasituskokeilla. Korotettu lämpötila (110 °F eli 49 °C) sekä ankkurointimassan kovettumisaika osoittautuivat kokeissa tekijöiksi, joiden haitallista vaikutusta ankkurin kestävyysajan pitkäaikaiskuormitettuna, ei pystytty ennustamaan lyhytkestoisten kuormituskokeiden tulosten perusteella. Davis huomasi myös, että pitkäaikaiskuormituskokeissa murtorajan kohdalla tapahtuvien siirtymien arvot olivat 1,33...2,00 kertaa suurempia kuin lyhytaikaisen kuormituksen seurauksena esiintyvät arvot. Suuremmilla kuormitustasoilla siirtymien huomattiin kasvavan epoksi- ja vinyylies-  
teripohjaisten ankkureiden kohdalla, kun hybridin kohdalla siirtymät kasvoivat vain hie-  
man.

Davis suosittelee vähennyskertoimen käyttöä ankkurin kestävyttä määrittäessä silloin, kun ankkuri altistetaan korkeille lämpötiloille ( $\geq 120^\circ \text{F}$  eli  $\geq 48,9^\circ \text{C}$ ) yli 20 %:n ajan sen käyttöiästä. Näissä tilanteissa ankkuri suositellaan myös testattavaksi vähintään korkeimmassa lämpötilassa, jolle ankkurin oletetaan altistuvan käytössä.

#### 4.4 Nilforoush

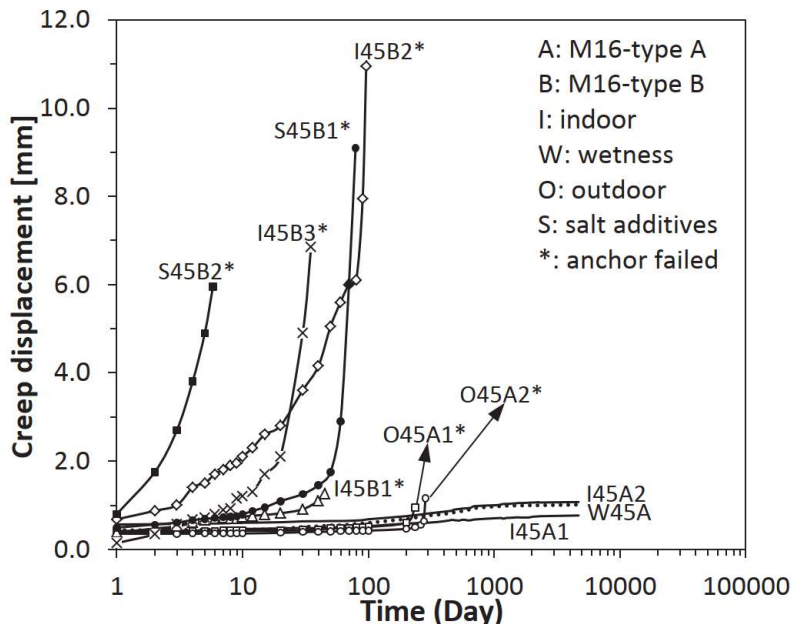
Nilforoush [11; 50] kokosi ja analysoi Elfgrenin ja Eriksonin [36; 37] aloittamien kuormituskokeiden tulokset vuonna 2017 julkaistussa väitöskirjassaan *Anchorage in Concrete Structures: Numerical and Experimental Evaluations of Load-Carrying Capacity of Cast-in-Place Headed Anchors and Post-Installed Adhesive Anchors*. Kokeissa tutkittiin tartunta-ankkureiden kestävyttä pysyvästi rasitettuina, sekä erilaisten käyttöolosuhteiden vaikutusta ankkureiden suorituskykyyn. Kokeet aloitettiin vuonna 1984 ja viimeiset niistä päätettiin vuonna 2013. Pisimpään jatkettut kokeet kestivät yli 28 vuotta (10 376 päivää). Kokeet suoritettiin Ruotsissa, ja tutkimus oli tulosta yhteistyöstä Luleå University of Technology, Structural Engineering -yksikön ja Research Institutes of Sweden (RISE), Building Structures -yksikön välillä.



Kuva 21. 15 kN voimalla pitkäaikaiskuormitettujen M16 ankkureiden rekisteröityjä siirtymiä eri koeolosuhteissa. [11, s. 120.]

Elfgrén ym. [36; 37] raportoivat tutkimuksen tuloksia jo vuosina 1987 ja 2001. Vuoden 1987 raportissa mainitaan, että pitkäaikainen pysyvä kuormitus johti viruman aiheuttamiin siirrymiin ulkona sijainneissa ankkureissa, joita rasitettiin 15 kN kuormalla. Lisäksi sisätiloissa suuremmilla kuormilla (30 kN) rasitettujen ankkureiden arveltiin pettävän lähitulevaisuudessa. Suurimmalla kuormalla (65 kN) rasitetut ankkurit osoittivat suuria siirrymiä, ja viisi ankkureista petti 2-96 päivän sisällä kokeen alkamisesta. Vuonna 2001 Elfgrén ym. raportoivat edelleen ulko-olosuhteissa sijainneiden ankkureiden osoittaneen merkkejä jatkuvasta muodonmuutoksesta koko testin ajan. Ulkona sijainnut betoni ei ollut pakkasenkestävää, joten se saattoi vaikuttaa ankkureiden toimintaan haitallisesti.

Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia erilaisten ympäristötekijöiden vaikutuksia pysyvästi rasitettujen kemiallisten ankkureiden toimintaan (Kuva 22 ja Kuva 23). Tutkittuja käyttöolosuhteita olivat sisälämpötila, ulkolämpötila, vaihteleva kosteus, märkyys (vesi betonin pinnalla) ja lisäaineet betonissa. Lisäksi arvioitiin tämänhetkisten matemaattisten mallien paikkansapitävyyttä viruman aiheuttamien muodonmuutosten määrittämisessä vertaamalla rasituskokeissa mitattuja arvoja mallien avulla saatuihin laskentatuloksiin. Tutkimus keskittyi vain staattisiin kuormiin. Pitkäaikaiskestävyyttä tutkittiin vain yhden tuntea-ankkurituotteen kohdalla.

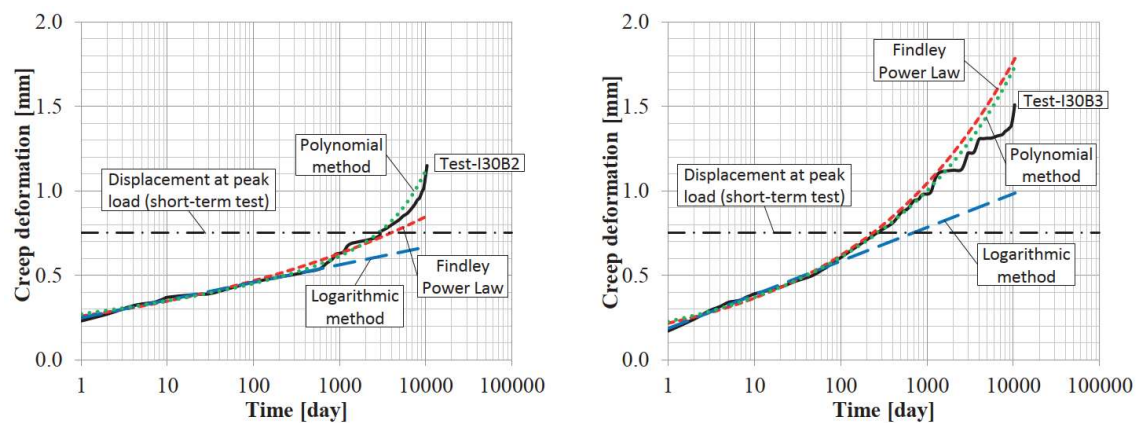


Kuva 22. 45 kN voimalla pitkäaikaiskuormitettujen M16 ankkureiden rekisteröityjä siirrymiä eri koeolosuhteissa. [11, s. 121.]



Kokeissa tutkituista olosuhteista ulkoilman lämpötilavaihteluilla sekä kosteudella havaittiin olevan epäsuotuisimmat vaikutukset pysyvästi kuormitettujen ankkureiden toimintakykyyn. Sisätiloissa testatut ankkurit kestivät jatkuvaa kuormitusta, jonka suuruus oli 47 % niiden keskimääräisen lyhytaikaisen kapasiteetin keskiarvosta. Ulko-olosuhteissa olleet pysyvästi kuormitetut ankkurit altistuivat suuremmille viruman aiheuttamille muodonmuutoksille ja ne pettivät, kun kuormitus kasvoi yli 23 %:iin niiden lyhytaikaisesta kapasiteetista. Tehdyistä rasituskokeista selviää myös, että viruman aiheuttamat muodonmuutokset voivat esiintyä, tai niiden suuruus kasvaa huomattavasti, vasta pitkän ajanjakson jälkeen. Eräät Boråsissa huoneenlämmössä rasitetut ankkurit osoittivat vain vähäisiä viruman aiheuttamia muodonmuutoksia ensimmäisen 3000 päivän (noin 8,2 vuotta) aikana, mutta viimeisen 20 vuoden aikana siirtymät kasvoivat huomattavasti (Kuva 21).

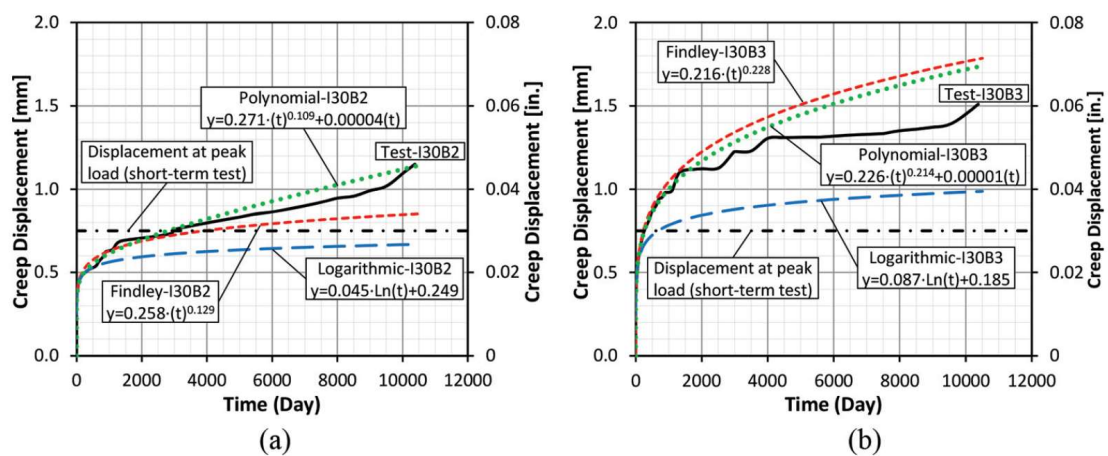
Nilforoush esittää, etteivät tämänhetkiset hyväksyntämenettelyt ole välttämättä luotettavia, kun kyseessä ovat pitkäaikaiskuormitetut tartunta-ankkurit. Standardien mukainen hyväksyty/hylätty -arviointitapa, jossa koetuloksien perusteella laskettua pitkäaikaisen kuormituksen aiheuttamaa tulevaisuuden siirtymää verrataan siirtymän raja-arvoon, on epävarma erityisesti kahden kohdan osalta. Ensimmäinen koskee matemaattisten mallien avulla laskettavaa ennustetta ankkurin siirtymästä, ja toinen siirtymän maksimiarvoa tietyllä kuormituksen tasolla.



Kuva 23. Nilforoushin suorittamaa vertailua eri ekstrapolointimenetelmien ja todellisten mittaustulosten välillä. [11, s. 125.]

Nilforoush suoritti vertailua rasituskokeista saatujen tulosten ja matemaattisten mallien antamien ennusteiden välillä (Kuva 23 ja Kuva 24). Vertailussa käytetyt mallit olivat

Logarithmic model, Findley Power Law model ja Polynomial model. Kaksi malleista, Findley Power Law sekä Polynomial method, antoivat kahdessa suoritetussa vertailussa yhden todenmukaisen arvion ankkurin siirtymästä ja toisen todellista pienemmän arvon siirtymälle. Logarithmic model antoi molemmissa suoritetuissa vertailuissa arvot, jotka olivat huomattavasti todellista siirtymää alhaisemmat. Tulosten välillä on hajontaa, ja käytetyn mallin tarkkuus riippuu myös ankkurista, johon sitä sovelletaan. Koetulokset, joihin mallien avulla laskettuja arvoja verrattiin, olivat rasituskokeista, joissa kuormat olivat 47 %:a ankkurin keskimääräisestä lyhytaikaisesta vetokestävyyydestä. Hyväksyntästandardista riippuen ankkureita rasitetaan pitkäaikaiskuormalla, jonka suuruus on 40...55 % niiden keskimääräisestä lyhytaikaisesta vetokestävyyydestä.

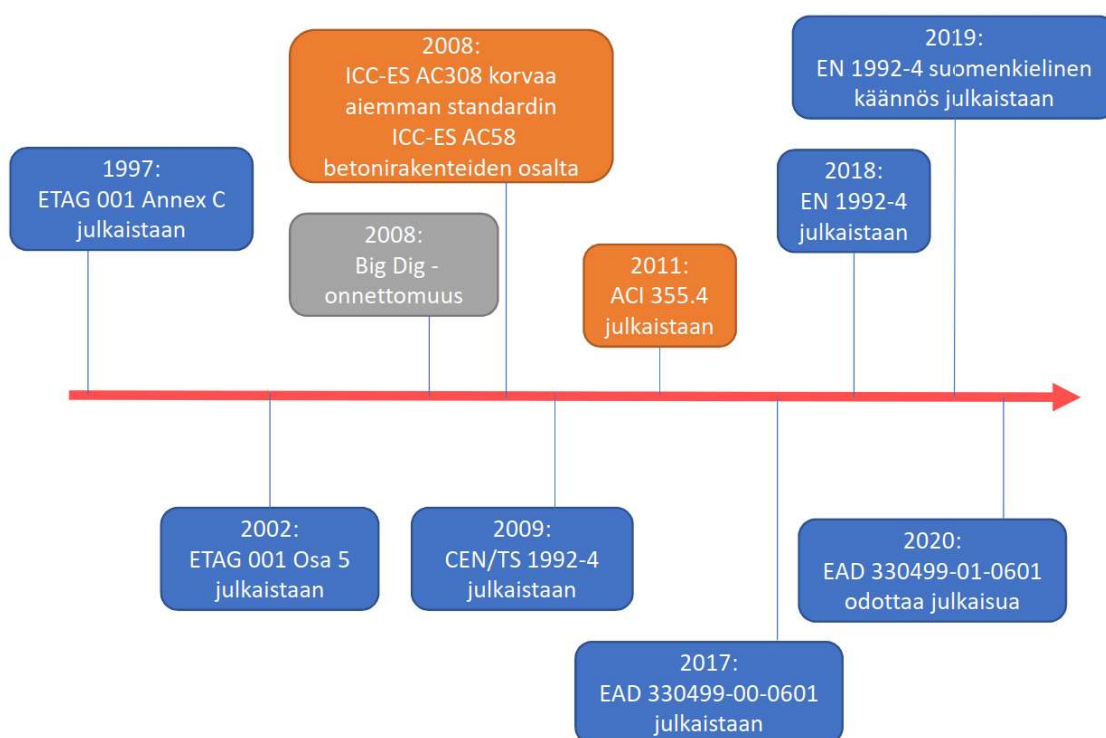


Kuva 24. Nilforoushin suorittamaa vertailua eri ekstrapolointimenetelmien ja todellisten mittaus- tulosten välillä. [50, s. 258.]

Rasituskokeissa ankkurin huomattiin kestävän sille kohdistetun kuorman, vaikka siirtymät ylittivät selvästi niille hyväksyntäkriteerien asettamat raja-arvot. Virumasta aiheutuvien siirtymien suuruus riippuu pitkäaikaiskuormituksen aikana vaikuttavien kuormien suuruudesta. Murtuma lyhytaikaisessa rasituskokeessa ei välttämättä tapahdu samalla hetkellä vastaavan suuruisen pitkäaikaiskuormituksen aikana. Nilforoush huomauttaa myös, että tämänhetkisten tuotekohtaisten hyväksyntäkriteerien mukainen ankkurin arviointi tietyllä kuormitustasolla johtaa siihen, että ankkurin voidaan olettaa toimivan hyväksytysti vain tällä nimenomaisella kuormituksella.

## 5 Standardit, tuotehyväksynät, suunnitteluohjeet

Kemiallisen ankkurin kestävyys eri käyttöolosuhteissa on riippuvaista käytetystä ankkurituotteesta. Tästä syystä ankkurit käyvät läpi hyväksyntämenettelyn, jossa kunkin tuotteen suorituskykyä sekä lyhyt- että pitkäaikaiskuormitettuna arvioidaan. Betonirakenteisiin jälkiasennettaville kiinnikkeille on kohteesta ja alueesta riippuen erilaisia suunnitteluohjeita ja testausmenetelmiä. Euroopassa kemiallisten ankkureiden suunnittelua koskee standardi EN 1992-4 ja kemiallisten ankkureiden hyväksyntää ohjaa EAD 330499-0601 (Kuva 25). Yhdysvalloissa kemiallisten ankkureiden arviointiin on käytössä useita eri organisaatioiden julkaisemia standardeja, esimerkiksi ACI 355.4. sekä ICC-ES AC308 (Kuva 25).



Kuva 25. Kuvassa esitetty seuraavissa kappaleissa käsiteltyjen standardien julkaisuaikoja.

Monet standardeista ovat uusia, sillä Big Dig -tunnelin onnettomuuden jälkeen myös pitkäaikaiskuormituksen testaus muuttui pakolliseksi niidenkin ohjeiden osalta mihin se ei aiemmin sisältynyt. Standardien välillä on eroja esimerkiksi testijaksojen pituuksissa sekä kuormitustasojen suuruuksissa. EAD 330499-00-0601 on monelta osin yhtenäinen Yhdysvalloissa julkaistujen ICC-ES AC308- ja ACI 355.4-standardien kanssa, sillä molemmat Yhdysvaltojen ohjeet on suunniteltu ETAG 001:en pohjalta. EAD 330499-00-

0601 korvasi ETAG 001 osan 5 vuonna 2017, mutta esimerkiksi pitkäaikaiskuormituskestävyyttä arvioivien kokeiden osalta sisältö ei muuttunut merkittävästi. Muutokset koskivat pääosin lujuusarvojen määrittystä.

## 5.1 Eurooppa

### 5.1.1 Eurokoodi EN 1992-4

Suomessa ja muissa CEN:in jäsenmaissa jälkiasennettavien kiinnikkeiden suunnittelun tulee noudattaa standardia EN 1992-4:2018. Eurodoce 2: Design of concrete structures. Part 4: Design of fastenings for use in concrete [1]. Standardi julkaistiin alun perin vuonna 2018 ja siitä ilmestyi suomenkielinen käännös marraskuussa 2019. EN 1992-4 korvasi ETAG 001 Annex C:ssä esitetyn tartunta-ankkureiden suunnitteluohjeen sekä CEN/TS 1992-4:n. EN 1992-4 perustuu kiinnikkeen 50 vuoden suunniteltuun käyttöikänsä. Standardi koskee jälkiasennettavia kiinnikkeitä, joiden ankkurointisyvyys täyttää ehdon  $h_{ef} \leq 20d_a$ . Standardi ei koske kiinnikkeitä, jotka on asennettu kuitubetoniin.

Tämän työn kannalta mielenkiintoisin kohta EN 1992-4 -standardissa on kohdassa 7.2.1.6(2) esitettävä tuotteesta riippuva  $\psi_{sus}^0$  -kerroin, jolla otetaan huomioon pitkäaikaiskuorman vaikutus tartuntalujuuteen. Kertoimen arvo esitetään ankkurin eurooppalaisessa teknisessä tuote-eritelmässä, joka tyypillisesti on sen ETA-hyväksyntädokumentti. Mikäli arvoa ei ole esitetty, määräytyy se EN 1992-4 -standardin kohdan 7.2.1.6 mukaan. Suomenkielinen käännös kyseisestä kappaleesta on harhaanjohtava, sillä se on helposti tulkittavissa niin, että ankkurin on sijaittava korkeassa lämpötilassa (43 °C) vähintään 10 vuoden ajan (Kuva 26 ja Kuva 27). Käännöksestä on oltu tätä opinnäytetyötä tehdessä yhteydessä Eurokoodi Help Deskiin, ja standardin virheelliseen käännökseen on tehty korjaus 1.4.2020.

Jos tuotteelle ei ole esitetty arvoa eurooppalaisessa teknisessä tuote-eritelmässä, käytetään arvoa  $\psi_{sus}^0 = 0,6$ .

Arvo  $\psi_{sus}^0 = 0,6$  vastaa pitkäaikaista vetokuormaa 50 vuoden suunnitellulla käyttöiällä betonin lämpötilan ollessa 43 °C ankkurien alueella vähintään 10 vuotta. Pitkäaikaisen lämpötilan ollessa eri kuin 43 °C käytetään arvoja, jotka määritetään testien perusteella. Betonin lämpötilan ollessa alle 43 °C kerroin  $\psi_{sus}^0$  on yleensä yli 0,6.

Kuva 26. Kuvakaappaus suomeksi käännetyn standardin EN 1992-4 kohdasta 7.2.1.6(2) [9, s.55.]

Kappaleesta tulisi käydä selkeämmin ilmi, että kerroin  $\psi_{\text{sus}}^0=0,6$  silloin, kun pitkäaikaisesti kuormitettu ankkuri on normaalissa lämpötilassa (24 °C) ja silloin sen käyttöikä on 50 vuotta. Kun pitkäaikaisesti kuormitettu ankkuri on pysyvästi korotetussa lämpötilassa (43 °C), sen käyttöikä on noin 10 vuotta. Useat standardit oletavan ankkurin voivan olla korotetussa lämpötilassa 20 % käyttöiästään, mutta tässä tilanteessa korkean lämpötilan oletetaan olevan seurausta lämpötilan vaihtelusta, eli lämpötila ei ole pysyvästi korkea. Jos lämpötila on pysyvästi korkea, ei edellä mainittu oletus päde, ja ankkurin käyttöikä voidaan taata vain kymmenen vuoden ajaksi. Tämän jälkeen ankkurin jäljellä olevaa käyttöikää tulee arvioida uudelleen.

If no value is given in the European Product Specification for the product a value  $\psi_{\text{sus}}^0 = 0,6$  should be used. The value  $\psi_{\text{sus}}^0 = 0,6$  relates to sustained tension load being present during a design life of 50 years and a minimum of 10 years at a concrete temperature of 43 °C in the region of the fasteners. For fastenings with a long term temperature other than 43 °C different values will apply and these should be obtained by appropriate testing and assessment. In general, for a temperature in the concrete smaller than 43 °C the factor  $\psi_{\text{sus}}^0$  will be larger than 0,6.

Kuva 27. Kuvakaappaus alkuperäisestä standardin EN 1992-4 kappaleesta 7.2.1.6(2) [1, s.55.]

Tarkka arvo  $\psi_{\text{sus}}^0$  -kertoimelle saadaan ankkurin testauksen ja arvioinnin avulla, ja se on yleensä ilmoitettu ETA-arviointidokumentissa.

### 5.1.2 Hyväksyntämenettelyohje ETAG 001

The European Organization for Technical Approvals (EOTA) julkaisi aiemmin hyväksyntämenettelyohjeita European Technical Approval Guidelines (ETAG). Jo muilla EAD- ja TR-dokumenteilla korvattu ETAG 001, Guideline for European technical approval for metal anchors for use in concrete käsitteli betonirakenteissa käytettäviä metallisia ankkureita. Se sisälsi ohjeet ankkureille suoritettavista kokeista ja niille määrättyistä hyväksyntäkriteereistä. ETAG 001 Osa 5 [52] käsitteli tartunta-ankkureita ja sen korvasi vuonna 2017 julkaistu EAD 330499-00-0601. ETAG 001 Annex C [53] ohjeisti tartunta-ankkureiden suunnittelussa, ja se korvattiin vuonna 2018 julkaistulla standardilla EN 1992-4.

ETAG 001 -ohjetta on käytetty lähteenä International Code Council Evaluation Servicen (ICC-ES) tuotehyväksyntäkriteerit esittävälle dokumentille ICC-ES AC308.

### 5.1.3 Eurooppalainen tekninen arviointi EAD 330499-00-0601

EOTAn vuonna 2017 julkaisema European Assessment Document EAD 330499-00-0601, Bonded fasteners for use in concrete, [2] korvasi ETAG 001 Osa 5:n. Dokumentti koskee valmiiksi porattuun reikään kohtisuoraan pintaa vasten asennettuja tartunta-ankkureita, jotka koostuvat ankkuroitavasta metalliosasta sekä ankkurointimassasta. EAD 330499-00-0601 perustuu ankkurin 50 vuoden suunniteltuun käyttöikään.

EAD 330499-00-0601:ssä esitetään kolme lämpötilaluokkaa, joissa ankkuri voidaan hyväksyä käytettäväksi (Taulukko 1). Luokkien lämpötila-asteikot ovat identtiset ETAG 001 Osa 5:n kanssa. Luokka T3 on tarkoitettu valmistajan esittämien lämpötilojen testaukseen. Lämpötilaluokan alaraja on  $-40\text{ °C}$ . Lyhytaikainen maksimilämpötila on oltava vähintään  $40\text{ °C}$  tai korkeampi, ja pitkäaikainen maksimilämpötila 0,6...1-kertainen lyhytaikaiseen maksimilämpötilaan nähden.

Lämpötilaluokka	Lyhytaikainen maksimilämpötila	Pitkäaikainen maksimilämpötila
T1	$24\text{ °C}$	$40\text{ °C}$
T2	$50\text{ °C}$	$80\text{ °C}$
T3	valmistajan pyynnöstä	valmistajan pyynnöstä

Taulukko 1. EAD 330499-00-0601:ssä määritellyt lämpötilaluokat kemiallisen ankkurin käyttöikänsä ajaksi [2].

Korotetun lämpötilan vaikutusta ankkurin toimintaan selvittävät kokeet suoritetaan jokaisen testattavan lämpötilaluokan pitkäaikaisessa maksimilämpötilassa sekä lyhytaikaisessa maksimilämpötilassa. Kokeissa ankkurit asennetaan valmistajan ohjeen mukaisesti ja kuormitetaan huoneenlämmössä, jonka jälkeen lämpötilaa nostetaan noin 20 K tunnissa, kunnes vaadittu lämpötila saavutetaan. Koekappaleet pidetään tässä lämpötilassa vielä 24 tuntia ennen kuin varsinainen koe suoritetaan. Kokeita tulee suorittaa vähintään viisi kappaletta kussakin testattavassa lämpötilassa.

Pitkäaikaiskuormitetun ankkurin kapasiteettia ja viruman suuruutta testataan sekä normaalissa ympäristön lämpötilassa että pitkäaikaisessa maksimilämpötilassa. Ankkurit asennetaan huoneenlämmössä ja kuormitetaan. Tämän jälkeen pitkäaikaisen maksimilämpötilan kohdalla lämpötila nostetaan tavoitelluksi. Koetta tulee jatkaa siihen asti, kunnes siirtymän muutos on vakiintunut, mutta sen on kuitenkin kestettävä vähintään kolme kuukautta. Kokeen päätyttyä ankkureille kohdistetut kuormat poistetaan, siirtymät

mitataan ja lopuksi ankkurit kuormitetaan murtoon asti, millä selvitetään ankkurin jäljellä oleva kuormitettavuus. Lämpötila pysyy kuormituksen ajan samana kuin aiemmankin testin aikana.

Normaalissa lämpötilassa suoritettujen kokeiden tulokset ekstrapoloidaan 50 vuoden päähän ja pitkäaikaisessa maksimilämpötilassa tehdyt kokeen tulokset 10 vuoden päähän. Ekstrapoloinnissa käytettävien siirtymän arvojen tulee olla mitattu pitkäaikaiskuormituskokeissa vähintään 20 päivän ajalta (vähintään 20 mitattua arvoa). Ekstrapoloiduilla saatuja tuloksia verrataan siirtymän raja-arvoon, joka on referenssikokeissa määritetty keskimääräinen siirtymä tartuntakyvyn häviämisen hetkellä. Mikäli siirtymä tulevaisuudessa jää alle raja-arvon, on ankkuri hyväksytty. Jos ehto ei täyty, koe voidaan toistaa eri parametreilla, kuten pienemmällä kuormalla tai pienemmällä pitkäaikaisen lämpötilan maksimiarvolla.

## 5.2 Yhdysvallat

Kemiallisten ankkureiden testejä ja arviointia varten on Yhdysvalloissa useiden eri organisaatioiden julkaisemia ohjeita ja standardeja. International Code Council Evaluation Service (ICC-ES) on julkaissut ICC-ES AC308 -standardin Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements, joka korvasi aiemman ICC-ES AC58 -ohjeistuksen, Acceptance Criteria for Adhesive Anchors in Concrete and Masonry Elements, betonirakenteisiin tehtävien kiinnitysten osalta. Lisäksi American Concrete Institute (ACI) on julkaissut standardin ACI 355.4 Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete, joka perustuu aiemmin julkaistuun ICC-ES AC308 -standardiin.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) julkaisee omia ohjeitaan tartunta-ankkureiden testauksesta ja suunnittelusta. American Society for Testing and Materials (ASTM) on myös julkaissut esimerkiksi ASTM E1512-01 -standardia Standard Test Methods for Testing Bond Performance of Bonded Anchors. Lisäksi esimerkiksi eri osavaltioiden liikennevirastot julkaisevat omia ohjeita ja standardejaan. Samat organisaatiot ovat myös suorittaneet paljon ankkureihin liittyviä tutkimuksia yhdessä eri yliopistojen kanssa.

### 5.2.1 American Concrete Institute

ACI 355.4 Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete julkaistiin vuonna 2011 ja se sisältää koe- ja arviointikriteerit betoniin kiinnitettävälle kemiallisille ankkureille. Standardia on suositeltu käytettäväksi lähteenä AASHTO-standardeille ja ohjeille.

Davis [32] ja Nilforoush [11] vertailivat standardeja väitöskirjoissaan. Lisäksi eri ohjeiden sisältöihin on perehdytty myös NHCHRP:n julkaisemassa kahdessa eri raportissa, Long-Term Performance of Epoxy Adhesive Anchor Systems [5] ja Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions [17]. Edellä mainituista lähteistä saatujen tietojen perusteella selviää, että ACI-standardin 355.4 mukaiset pitkäaikaiskuormituskoeket ovat hyvin samankaltaiset kuin EAD 330499-00-0601 mukaiset. Suurimpana eroavaisuutena on, että ACI 355.4:n mukaisten kokeiden on kestettävä 42 päivää, kun EAD 330499-00-0601 mukaisten kokeiden on kestettävä vähintään 3 kuukautta. Ekstrapolointiin vaadittava mittaustulosten määrä on vastaava kuin EAD 330499-00-0601:ssä ja ekstrapoloinnissa käytetään myös Findley Power Law -menetelmää.

ACI 355.4:n mukaisesti suunnitellut tartunta-ankkurit on testattava vähintään 43 °C (110 °F) pitkäaikaisessa maksimilämpötilassa ja 54 °C (130 °F) lyhytaikaisessa maksimilämpötilassa. Ennen ACI 355.4 -standardia, ankkurit voitiin hyväksyä vain 19 °C pitkäaikaisessa lämpötilassa. [10.]

### 5.2.2 International Code Council

Kemiallisten ankkureiden arviointi tapahtui aiemmin standardin ICC-ES AC58, Acceptance Criteria for Adhesive Anchors in Concrete and Masonry Elements, mukaan. ICC-ES AC58 perustuu niin kutsuttujen sallittujen jännitysten -menetelmään (ASD), jossa jännitys pyritään rajoittamaan tiettyyn raja-arvoon. Hyväksyntäkriteerit esittävä dokumentti julkaistiin alun perin vuonna 1995, ja vuoden 2008 alussa ICC-ES AC308 korvasi sen betonirakenteisiin tehtävien kiinnitysten osalta.

ICC-ES AC308 Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements [14] perustuu niin kutsuttuun osavarmuusmenetelmään (LRFD), jossa käytetään erilaisia varmuuskertoimia kuormille ja materiaaleille. LRFD-menetelmä muistuttaa



ASD-menetelmää enemmän Eurokoodien mukaista lähestymistapaa. AC308 mukainen ankkurin hyväksyntä vaatii myös virumistestien suorittamisen, mikä oli AC58 mukaisessa hyväksynnässä vielä vapaaehtoista.

Vetokokeet korotetussa lämpötilassa suoritetaan standardin mukaisesti vähintään viidelle ankkurille kussakin lämpötilaluokassa.

ICC-ES AC308 -standardin lähteenä toimi ETAG 001 osa 5, ja myöhemmin ICC-ES AC308 oli pohjana American Concrete Instituten julkaisemalle ACI 355.4.-standardille.

## 6 Suunnittelu- ja arviointimenetelmiä kohtaan esitetty kritiikki

Kemiallisten ankkureiden nykyisiä hyväksyntämenetelmiä ja niiden perusteita kohtaan on esitetty kritiikkiä. Pitkäaikaiskuormitetun ankkurin käyttöiän arvioinnissa käytettyjä ekstrapolointimenetelmiä on vertailtu esimerkiksi Nilforoushin väitöskirjassa [11]. Rasi-tuskokeissa saatuja siirtymiä verrattiin ekstrapoloimalla saatuihin tuloksiin ja vertailun tulokset osoittivat eri menetelmien heikkouksia ja epätarkkuuksia. Bostonin Ted Williams -tunnelin onnettomuuden jälkeen Ocel [43] analysoi eri menetelmiä ja tutkimuksen perusteella Polynomial model -menetelmän avulla saadut tulokset ennustivat Ted Williams -tunnelissa käytettyjen ankkureiden murren suhteellisen tarkasti.

Myös Muciaccia [42] tutki asiaa ja esitti tutkimuksensa perusteella kritiikkiä erityisesti niin sanottua Findley Power Law -menetelmää kohtaan. Hän huomauttaa, että tämänhetkiset Euroopassa ja Yhdysvalloissa käytössä olevat arviointimenetelmät jättävät kuormitustason suuruuden täysin huomioimatta. Muciaccian suorittamissa pitkäaikaisen kuormituksen vaikutuksia tutkivissa kokeissa ankkurin siirtymät olivat huomattavasti suurempia, kun pitkäaikaiskuormituksen taso on korkeampi, 60...80 % ankkurin lyhytkestoisesta kapasiteetista. Ankkurin siirtymät murtumisen hetkellä olivat myös merkittävästi suurempia kuin siirtymät murtuman hetkellä vertailukohtana käytetyissä lyhytkestoisissa kokeissa.

Pitkäaikaiskuormituskapasiteettia selvittävät kokeet suoritetaan yleensä kuormitustasoilla, jotka vastaavat 40...55 %:a ankkurin keskimääräisestä tartuntalujuudesta. Veto-kokeiden kesto riippuu standardista, mutta se on yleensä alle 3 kuukautta. Kuormituksen aikana ankkurin siirtymiä seurataan ja mitataan standardissa esitetyllä tarkkuudella. Mittattujen siirtymien arvot ekstrapoloidaan 50 vuoden päähän (normaalilämpötila) tai 10 vuoden päähän (korotettu lämpötila), ja saatuja tuloksia verrataan lyhytaikaisista kuormituskokeista saatuihin siirtymäarvoihin. Ekstrapoloitujen arvojen tulee olla pienempiä kuin lyhytaikaisista kokeista saadut vertailuarvot. Tämänkaltaista hyväksyntämenettelyä ei pidetä riittävänä, sillä siitä saadut tulokset perustuvat vain lyhytkestoisiin kokeisiin. Menettelyn tulokset eivät kerro tarkasti ankkurin käyttäytymisestä pitkällä aikavälillä tai eri kuormitussuuruuksilla. [11.]

Kemiallisten ankkureiden kestävyyttä pitkäaikaiskuormitettuna arvioivien kokeiden pituutta on kritisoitu, sillä ne ovat kestoltaan vain murto-osan ankkurin suunnitellusta käyttöiästä. Kokeiden lyhyen keston seurauksena on kemiallisten ankkureiden tulevaisuuden

siirtymiä arvioitaessa käytettävän mallin avulla voitava saavuttaa tarkkoja tuloksia, mikä edellyttää luotettavan mallin käyttöä arvioinnissa. Tutkittaessa eri menetelmiä on havaittu, että niiden antamissa tuloksissa esiintyy suuriakin vaihteluita. Menetelmät jättävät esimerkiksi huomioimatta betonin viruman, jota ilmenee jo matalissakin lämpötiloissa, ja jolla on vaikutusta myös kemiallisen ankkurin muodonmuutoksiin. Myös kemiallisten ankkureiden virumaa tapahtuu matalissakin lämpötiloissa, jolloin sekä ankkurointimassan että betonin viruman aikaansaamat vaikutukset käyttöikään tulee pystyä arvioimaan. Koeolosuhteilla on myös vaikutusta ankkureiden viruman suuruuteen. Pitkäaikaiskuormitettujen ankkureiden viruma on suurempi kokeissa, joissa betonin laajenemista sivusuunnassa ei ole estetty (englanninkielinen termi *unconfined conditions*), kuin silloin kun laajeneminen on estetty (englanninkielinen termi *confined conditions*). [11; 42; 54.]

Arvioitaessa ankkurin toimintaa pitkäaikaiskuormitettuna 50 vuoden käyttöiän aikana on arvioinnissa käytettävän mallin täytettävä tietyt ehdot, jotta sillä saatavat tulokset voidaan olettaa luotettaviksi. Erityisesti tämä pätee silloin, kun ankkurille kohdistuvat kuormat ovat suuria ja käyttöiän aikaiset lämpötilat ovat korkeita. Tulosten tarkkuus edellyttää, että arviointiin valitun mallin avulla voidaan ottaa huomioon sekä ankkurimassan että betonin viskoelastinen käytös ja niiden ikääntymisen vaikutukset. Lisäksi oletus jännitysten jakautumisesta ankkurilta betonille tulee olla realistinen (vertaa jännitysten jakautuminen tasaisesti koko ankkurin matkalla) ja oikeat vaurioitumismekanismit huomioidu. The power law extrapolation method on alun perin kehitetty ikääntymättömien polymeerien käyttäytymisen arviointiin, minkä takia sen ei voida olettaa täysin esittävän esimerkiksi pitkäaikaiskuormitettujen tartunta-ankkureiden käyttäytymistä betoniin asennettuna. Tämänhetkisten hyväksyntämenettelyiden mukaisten menetelmien voidaan siis tulkita tarjoavan vain suuntaa-antavia tuloksia ankkurin mahdollisista siirtymistä ja kestävydestä.

Findley Power Law - ja Logarithmic model -menetelmät sopivat käytettäväksi sovelluksissa, joissa ankkureille kohdistuvat kuormat ovat melko pieniä ja lämpötilat verrattain matalia, jolloin niiden avulla analysoidaan ankkurisysteemin lineaarista viskoelastista käytöstä. Tällaisissa sovelluksissa edellä mainittujen menetelmien avulla voidaan hyvin arvioida ankkurin käytöstä ajan kuluessa. Edellä mainitut menetelmät eivät kuitenkaan huomioi kuormitustason kasvusta ja lämpötilan noususta aiheutuvia vaurioita tai ankkurin epälineaariseksi muuttuvaa käytöstä. Näissä olosuhteissa kyseisten menetelmien avulla ei voida arvioida ankkuria kovin luotettavasti edes lyhyellä aikavälillä, ja

useamman vuosikymmenen kohdalla vaihtelu niiden antamissa tuloksissa on kohtuuttoman suurta. Näissä olosuhteissa ilmenevät makroskooppiset muutokset ja epälineaariset vaikutukset vaativat tarkempaa ymmärrystä ankkurin mekaanisista ominaisuuksista, jotta ankkurisysteemin pitkäaikaiskapasiteetista voidaan saavuttaa edes karkeita arvioita. [55.]

Ocel [43] tutki Powersin valmistamia kemiallisia ankkureita Bostonissa tapahtuneen Big Dig -tunnelin onnettomuuden jälkeen. Hän käytti Logarithmic model- sekä Polynomial model -menetelmiä arvioidessaan testattujen ankkureiden tulevaisuuden siirtymiä. Laskennan perusteella Polynomial model -menetelmä arvioi toisen kemiallisen ankkurituotteen (Standard Set epoxy) pettävän 13,1...55,3 vuoden välillä. Logarithmic model -menetelmän avulla tälle tuotteelle saadut siirtymän arvot tulevaisuudessa olivat huomattavasti pienempiä ja niiden perusteella voitiin arvioida ankkurin kestävän yli 100 vuotta. Toisen tutkitun kemiallisen ankkurituotteen, Fast Set Epoxyn, arvioitiin kestävän 0,2...6,1 vuotta Polynomial model -menetelmän perusteella, ja yli 100 vuotta Logarithmic model -menetelmän avulla. Todellisuudessa osa rakenteesta sortui jo 7 vuoden jälkeen.

## 7 Tulokset

Tässä opinnäytetyössä on esitetty eri tekijöiden vaikutuksia kemiallisten ankkureiden käyttöikään. Näitä tekijöitä voivat olla erilaiset ankkuriin liittyvät tekijät sekä asennuksen ja käytön aikaiset tekijät. Tämän opinnäytetyön kannalta tärkeimmät tekijät ovat korotettu lämpötila ja pysyvä kuormitus, joiden on molempien todettu vaikuttavan negatiivisesti ankkurointimassan ominaisuuksiin. Saatavilla olleista tutkimuksista selvisi, että korkean lämpötilan vaikutusta kemiallisten ankkureiden kestävyYTEEN on tutkittu pääosin lyhytkestoisissa kokeissa. Ankkureiden käyttäytymistä pitkän ajan päästä on arvioitu erilais-  
ten matemaattisten mallien avulla.

Tutkimukset, joihin opinnäytetyön aikana perehdyttiin antavat ymmärtää, että pitkäaikainen korkea lämpötila voi rajoittaa kemiallisten ankkureiden käyttöä. Kemiallisten ankkureiden kestävyys eri olosuhteissa on kuitenkin tuotekohtaista, sillä vaihtelu eri ankkureiden ominaisuuksien välillä on suurta. Ankkurointimassojen erilaiset kemialliset koostumukset vaikuttavat esimerkiksi niiden lasittumislämpötilaan. Lisäksi tutkimuksissa ilmeni myös muita tekijöitä, joilla oli vaikutusta ankkurin tartuntalujuuteen, kuten esimerkiksi kosteus.

Kemiallisten ankkureiden ominaisuuksia voidaan arvioida luotettavasti vain ankkureiden testauksen avulla. Kemiallisia ankkureita koskevissa hyväksyntämenettelyohjeissa on eroja esimerkiksi pitkäaikaiskuormitusta koskevien menetelmien osalta. Vaikuttaa sille, että osa ekstrapoloinnissa käytetyistä malleista ei huomioi tiettyjä tekijöitä, jolloin niiden avulla saadut tulokset eivät välttämättä ole luotettavia esimerkiksi silloin, kun ankkureille kohdistuvat kuomat ovat suuria.

Opinnäytetyön tuloksena voidaan esittää, että joissain erityistilanteissa voi edellä mainituista syistä olla perusteltua valita toinen kiinnitysmenetelmä kemiallisen ankkurin sijasta. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi silloin, jos ankkuri altistuu korkealle lämpötilalle pidempään kuin 20 % sen käyttöiästä, tai jos käyttöiän aikainen lämpötila on huomattavan korkea. Ankkurivalinnan kannalta on tärkeää ymmärtää ja huomioida ankkurin käyttöön liittyvät rajoitukset. Tämä edellyttää, että ne ankkurin lujuuteen vaikuttavat kriittiset tekijät, joille ankkuri voi esimerkiksi käytön aikana altistua osataan tunnistaa ja ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa.

## 8 Yhteenveto

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää kemiallisten ankkureiden toimintaa korotetuissa lämpötiloissa erityisesti pitkäaikaiskuormitettuna. Tutkimusten mukaan edellä mainitut olosuhteet voivat heikentää kemiallisten ankkureiden kestävyttä merkittävästi, ja siksi korvaavan kiinnitystuotteen valinta voi olla perusteltua joissain tilanteissa. Suunnittelijan ei tulisi kuitenkaan jättää huomioimatta muita ankkureiden kestävyteen vaikuttavia tekijöitä, joista esimerkiksi kosteudella ja ulkoilmaolosuhteilla on tutkimuksissa havaittu myös olevan huomattava vaikutus ankkurin kapasiteettiin. Käyttöään ja lujuuden suhteen vallitsevan epävarmuuden ja ankkureiden pettämisestä seuranneiden onnettomuuksien seurauksena on kemiallisten ankkureiden käyttöä jopa rajoitettu joissain kohteissa. Tämän rajoituksen voi katsoa olevan oikeutettu, kun perehtyy ankkureista tehtyjen tutkimusten tuloksiin.

Kemiallisten ankkureiden avulla voidaan tehdä kiinnityksiä verrattain helposti, mutta niiden rajattu kestävyys erityisesti pitkäaikaiskuormitettuna korotetuissa lämpötiloissa aiheuttaa epävarmuutta. Standardeista voi tehdä erilaisia ja jopa harhaanjohtavia tulkin-toja ankkurin käyttöiästä näissä olosuhteissa. Käyttöikään ja siihen vaikuttavien tekijöiden arviointi vaatii syvällistä ymmärrystä esimerkiksi ankkureiden ominaisuuksista sekä arviointimenetelmistä. Tämän tärkeys korostuu erityisesti silloin, kun valitaan ankkuria erityisolosuhteisiin. Suunnittelija ei välttämättä löydä tuotetiedoista ja arviointidokumen-teista vastausta kysymyksiinsä, jolloin kommunikaatio ankkurivalmistajan kanssa on suositeltavaa. Ongelma kommunikaatiossa ankkurivalmistajien kanssa voi tulla esiin, jos suunnittelija ei osaa kysyä oikeita kysymyksiä, jolloin valmistajan edustajan voi olla mah-dotonta löytää niihin vastausta.

Suunnittelijalla on suuri vastuu kiinnitystuotetta valitessa. Sopivan tuotteen valinta edel-lyttää kemiallisten ankkureiden ominaisuuksien ja käyttäytymisen laajaa ymmärtämistä erilaisissa käyttöolosuhteissa. Aiheesta löytyy hyvin vähän tietoa, varsinkaan suomeksi, ja merkittävä osa tutkimuksesta on tehty Yhdysvalloissa sekä esimerkiksi Saksassa ja Ruotsissa. Osa tutkimuksista on julkisia, mutta suuri osa on saatavilla vain niiden toi-meksiantajille. Esimerkiksi ankkurivalmistaja on voinut tutkia ankkureiden toimintaa eri olosuhteissa enemmänkin, mutta nykyiset hyväksytyt/hylätty -arvostelukriteerit eivät vält-tämättä kannusta julkaisemaan näitä tuloksia.

Suoritettut kokeet ja tutkimukset ovat kalliita, ja varsinkin korotetun lämpötilan osalta ne ovat usein kestäneet vain lyhyitä ajanjaksoja. Ongelmallista pitkäkestoisissa tutkimuksissa voi olla rahoituksen saaminen sekä myös alan ja tuotteiden jatkuva kehittyminen. Kemiallisten ankkurituotteiden koostumukset muuttuvat uuden tiedon ja kustannustehokkaampien vaihtoehtojen seurauksena. Pitkäkestoisten tutkimusten tulokset eivät välttämättä ole enää ajankohtaisia ja merkityksellisiä kokeiden päätyttyä.

Tuotehyväksyntään johtavat rasituskokeet ovat kestoiltaan lyhyitä, mutta niiden perusteella tulisi kyetä määrittämään ankkurissa tapahtuvien muutosten suuruus 50 vuoden kuluttua. Lyhytkestoisten rasituskokeiden tulokset ekstrapoloidaan ja tuloksena saadaan tulevaisuuden siirtymän arvo. Tätä siirtymän arvoa verrataan raja-arvoon, minkä perusteella tuote joko hyväksytään tai hylätään. Kritiikki eri ekstrapolointimenetelmien avulla saatujen tulosten luotettavuutta kohtaan ei ole vielä kuitenkaan johtanut standardien päivittämiseen tältä osin.

Standardit ja erityisesti niissä esiintyvät viitearvot perustuvat erilaisiin tutkimuksiin, joita maailmalla on suoritettu. Kalifornian aavikolla sijaitsevasta siltarakenteesta vuonna 1991 mitattujen lämpötilojen perusteella on laadittu lämpötila-asteikko, johon kiinnitystuotteiden hyväksyntä perustuu esimerkiksi CEN-jäsenmaissa myös muiden rakenteiden osalta. Tämä ratkaisu ei välttämättä sovellu riittävän hyvin poikkeuksellisten käyttökohteiden suunnitteluun, joissa lämpötila voi olla pysyvästi korkea.

Kemiallisia ankkureita on markkinoilla useita erilaisia, ja luonnollisesti valmistajat eivät julkaise tuotteidensa sisältöä kovinkaan tarkasti. Käyttöturvallisuustiedotteista on mahdollista selvittää osa ankkurointimassoissa käytetyistä aineista. Ilman ankkurin testausta on kuitenkin mahdotonta luotettavasti arvioida tuotteen ominaisuuksia eri käyttöolosuhteiden vallitessa. Kirjallisuudessa esiintyy joitain ohjeellisia viittauksia eri aineiden ominaisuuksista esimerkiksi korkeissa lämpötiloissa, mutta tämän tiedon perusteella eri tuotteiden ominaisuuksien luotettava vertailu ei ole mahdollista. Kemiallisten ankkureiden tuotetiedoissa määritellyt ankkurikohtaiset sallitut lämpötilat perustuvat koetuloksiin.

Kemiallisten ankkureiden korvaamista toisella kiinnitysmenetelmällä on syytä harkita silloin, kun ankkuri on merkittävän osan käyttöiästään korotetuissa lämpötiloissa. Muita kiinnitystapoja voivat olla esimerkiksi ankkurointi pelkkää sementtiä sisältävän juotomassan avulla tai mekaanisen ankkurin käyttö. Sementti vaikuttaisi tutkimusten

perusteella sietävän korkeita lämpötiloja paremmin kuin erilaiset hartsit, jolloin pelkättään sementtiä sisältävän massan suorituskyky voi olla parempi korotetuissa lämpötiloissa. Mikäli korotettuun lämpötilaan yhdistyy lisäksi pitkäaikaiskuormitus, voi esimerkiksi mekaanisen ankkurin käyttö olla perusteltua. Tämä pätee erityisesti silloin, kun pitkäaikaiset kuormat ovat arvoltaan suuria.



## Lähteet

- 1 EN 1992-4:2018. 2018. Eurodoce 2: Design of concrete structures. Part 4: Design of fastenings for use in concrete. European Committee for Standardization. 127 s.
- 2 European Assessment Document – EAD 330499-00-0601: Bonded Fasteners for Use in Concrete. 2017. European Organization for Technical Approvals (EOTA).
- 3 Eligehausen, R., Cook, R. A., Appl, J. 2006. Behavior and design of adhesive bonded anchors, ACI Structural Journal Volume 103. s 822-831.
- 4 Eligehausen, R., Mallee, R., Silva, J. 2006. Anchorage in Concrete Construction. Ernst & Sohn, Berlin, Germany. s. 391.
- 5 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2013. Long-Term Performance of Epoxy Adhesive Anchor Systems. Washington, DC: The National Academies Press.
- 6 Mattis, L., Silva, J. 2011. Special Inspection Guidelines for Post-installed Anchors. Concrete Anchor Manufacturers Association (CAMA).
- 7 Cook, R. A., Kunz, J., Fuchs, W., Konz R. C. 1998. Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. ACI Structural Journal, Volume 95, Issue 1. s. 9-26.
- 8 Subramanian, N., Cook, R.A. 2002. Installation, behavior and design of bonded anchors. Indian Concrete Journal, 76. s. 47-56.
- 9 SFS-EN 1992-4:2018. 2018. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 4: Betonirakenteissa käytettävien kiinnikkeiden suunnittelu. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 126 s.
- 10 Hoermann-Gast, A., Olsen, J. 2017. The Effects of Temperature on Post-installed Adhesive Anchors. ISS-ES.
- 11 Nilforoush R. 2017. Anchorage in Concrete Structures: Numerical and Experimental Evaluations of Load-Carrying Capacity of Cast-in-Place Headed Anchors and Post-Installed Adhesive Anchors. PhD Dissertation. Luleå University of Technology.
- 12 T. Kränkel, D. Lowke, C. Gehlen. 2015. Prediction of the creep behavior of bonded anchors until failure – A rheological approach. Construction and Building Materials, Volume 75. s 458-464.

- 13 Adams, R. D. and Wake, W. C. 1984. *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, pp. 160–162.
- 14 ICC-ES AC308 : Acceptance Criteria for Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements. 2019. ICC Evaluation Service International Inc., Whittier, CA.
- 15 Jain, P. 2005. *Effect of Coarse Aggregate on the Strength of Adhesive-Bonded Anchors*. Master's thesis. University of Florida.
- 16 Ribeiro, M.C.S., Nóvoa, P.R., Ferreira, A.J.M., Marques, A.T. 2004. Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions. *Cement and Concrete Composites*, Volume 26, Issue 7. s. 803-809.
- 17 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2009. *Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions*. Washington, DC: The National Academies.
- 18 Çolak, A. 2001. Parametric study of factors affecting the pull-out strength of steel rods bonded into precast concrete panels. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 21, Issue 6.
- 19 Singer, G., Sinn, G., Schwendtner, K., Lichtenegger, H.C., Wan-Wendner, R. 2018. Time-dependent changes of mechanical properties of polymer-based composite materials for adhesive anchor systems, *Composite Structures*. Volume 196. s. 155-162.
- 20 Klompen, E. T. J., Engels, T. A. P., Breemen, van, L. C. A., Schreurs, P. J. G., Govaert, L. E., & Meijer, H. E. H. 2005. Quantitative prediction of long-term failure of Polycarbonate. *Macromolecules*, 38(16). s. 7009-7017.
- 21 Lahouar, A., Al-Mansouri, O., Pinoteau, N., Mege, R., Guillet, T. 2019. Prediction of failure time of post-installed rebars at high temperature using a non-linear shear-lag model. Conference paper, IFireSS, 3rd International Fire Safety Symposium, Ottawa, Canada.
- 22 Reis, J. 2012. Effect of Temperature on the Mechanical Properties of Polymer Mortars. *Materials Research*. 15(4). s. 645-649.
- 23 National Transportation Safety Board. 2007. *Ceiling Collapse in the Interstate 90 Connector Tunnel, Boston, Massachusetts, July 10, 2006*. Highway Accident Report NTSB/HAR-07/02. Washington, DC.
- 24 Ray, J., De la Guardia, C., McCreary Jr., C. 1987. Strength of Epoxy-Grouted Anchor Bolts in Concrete. *Journal of Structural Engineering* 113(1987)12, s. 2365–2381.

- 25 Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. CE-merkintä. Internetsivu. [https://www.sfs.fi/julkaisut\\_ja\\_palvelut/standardi\\_tutuksi/ce-merkinta](https://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/standardi_tutuksi/ce-merkinta) Luettu 12.4.2020.
- 26 Euroopan komissio. 2015. Rakennustuotteen CE-merkintä vaihe vaiheelta. Saatavissa <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/12322?locale=fi>
- 27 European Organisation for Technical Assessment EOTA. Do you want to CE mark your construction product? Internetsivu. <https://www.eota.eu/en-GB/content/do-you-want-to-ce-mark-your-construction-product/18/> Luettu 12.4.2020.
- 28 Cook, R. A., Konz, R. C. 2001. Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors. *ACI Structural Journal*, Volume 98, Issue 1. s. 76-86.
- 29 FDOT. 2019. Standard Specifications for Road and Bridge Construction, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL.
- 30 Krishnamurthy, K. 1996. Development of a Viscoplastic Consistent Tangent FEM Model with Applications to Adhesive Bonded Anchors. Dissertation, University of Florida, Gainesville, FL.
- 31 Grosser, P., Fuchs, W., Eligehausen, R. 2011. A field study of adhesive anchor installations. *Concrete International*, January 2011.
- 32 Davis, T. M. 2012. Sustained Load Performance of Adhesive Anchor Systems in Concrete. PhD Dissertation. University of Florida, Gainesville, FL.
- 33 Eligehausen, R., Balogh, T. 1995. Behavior of Fasteners Loaded in Tension in Cracked Reinforced Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 3. s. 365–379.
- 34 Fuchs, W., Eligehausen, R., and Breen, J. E. 1995. Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete. *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 1. s. 73–94.
- 35 Chin, J., Hunston, D., Forster, A. 2010. Thermo-viscoelastic analysis of Ambient Cure Epoxy Adhesives Used in Construction Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering* 22/10.
- 36 Elfgren L, Danielsson G, Holm I, Söderlind G. 2001. Long time load-carrying capacity of bonded anchors. *Teoksessa: Connections between steel and concrete Cachan (Val-de-Marne)*. s. 391–401.
- 37 Elfgren, L., Anneling, R., Eriksson, A., Granlund, S-O. 1987. Adhesive anchors : Tests with cyclic and long-time loads. 1987. (SP Rapport).

- 38 Messler, R. W. 2004. *Joining of Materials and Structures*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- 39 Burtz, J. L. 2003. Behavior and design of grouted anchors loaded in tension including edge and group effects and qualification of engineered grout products. Master's thesis. University of Florida, Gainesville, FL.
- 40 Nemeš, R., & Lublóí, É. 2011. Application of anchors under special concrete conditions.
- 41 Feng, C. W., Keong, C. H., Hsueh, Y. P., Wang, Y. Y., Sue, H. J. 2005. Modeling of long-term creep behavior of structural epoxy adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 25, Issue 5. s. 427-436.
- 42 Muciaccia G., Consiglio A., Rosati G. 2018. Creep Behavior of Bonded Anchor Under High Sustained Loading at Long Term Temperature. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. Springer, Cham.
- 43 Ocel, J.M., Hartmann, J., & Fuchs, P.A. 2007. TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER REPORT I-90 Seaport Portal Tunnel Partial Ceiling Collapse Investigation: Sustained Load Behavior of Powers Fasteners Power-Fast+ Adhesive Anchors.
- 44 Tom Regan. 2012. Report: Defective epoxy to blame for 17th St. Bridge fencing collapse. Verkkoinfo. WSB-TV Atlanta. <https://www.wsbtv.com/news/report-defective-epoxy-blame-17th-st-bridge-fencing/242643269> Luettu 29.11.2019.
- 45 RAIB. 2013. Rail Accident Investigation: Interim Report IR1/2013. Rail Accident Investigation Branch, Department for Transport.
- 46 RAIB. Rail Accident Report 13/2013, Partial failure of a structure inside Balcombe Tunnel. Rail Accident Investigation Branch, Department for Transport.
- 47 Masahiro Shirato. 2014. Investigation of Tunnel Ceiling Collapse Accident.
- 48 Dusel, J. P., Mir, A. A. 1991. Initial Evaluation of Epoxy Cartridges used for Anchoring Dowels into Hardened Concrete. Minor Research Report. California Department of Transportation, Sacramento, California.
- 49 Dusel, J. P., Mir, A. A. 1993. Evaluation of New Bonding Materials for Anchoring Dowels in Existing Concrete. Final Report. California Department of Transportation, Sacramento, California.
- 50 Nilforoush, R., Nilsson, M., Söderlind, G., Elfgrén, L. 2016. Long-Term Performance of Adhesive Bonded Anchors. *ACI Structural Journal*. 113. 10.14359/51688060.

- 51 Eurokoodit. EN 1992-4: Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 4: Betonirakenteissa käytettävien kiinnikkeiden suunnittelu. Internetsivu. <https://www.eurocodes.fi/betonirakenteet/en1992-4-eurokoodi-2-betonirakenteiden-suunnittelu/> Luettu: 8.2.2020.
- 52 ETAG 001 – Part 5. Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete, Bonded Anchors. European Organization for Technical Approvals. Brussels, Belgium, Mar. 2002 edition, amended Nov. 2006, Feb. 2008, and Apr. 2013.
- 53 ETAG 001 – Annex C. Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete, Design Methods for anchorages. European Organization for Technical Approvals. Brussels, Belgium, Mar. 2002 edition, amended Nov. 2006, Feb. 2008, and Apr. 2013
- 54 Boumakis, I., Marcon, M., Ninčević, K., Czernuschka, L-M., Wan-Wendner, R. 2018. Concrete creep and shrinkage effect in adhesive anchors subjected to sustained loads. Engineering Structures, Volume 175. s. 790-805.
- 55 Podroužek, J., Vorel, J., Wan-Wendner, R. 2016. Uncertainty Quantification of Extrapolation Techniques for Bonded Anchors. 14th International Probabilistic Workshop, Ghent, Belgium. s. 189–201.