



Betonirakenteiden liimausvahventamisohteet



Betonirakenteiden liimausvahventamisohjeet

Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus

Tiehallinto

Helsinki 2007

ISBN 978-951-803-835-4
TIEH 2000013-07

Verkkoversio (<http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut>) pdf
ISBN 978-951-803-836-1
TIEH 2000013-v-07

Edita Prima Oy
Helsinki 2007

Julkaisua myy
Edita Prima Oy
Puhelin 020 450 011
Faksi 020 450 2470
sähköposti: asiakaspalvelu.prima@edita.fi



Painotuote

Tiehallinto
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 2211

VASTAANOTTAJA
Jakelun mukaan

SÄÄDÖSPERUSTA
Maantielaki 109 §

KORVAA/MUUTTA

KOHDISTUVUUS
Tiehallinto

VOIMASSA
1.2.2007 - toistaiseksi

ASIASANAT

Ohjeet, sillansuunnittelu, sillanrakennus, korjaus, vahvistaminen, liimaus, palkit, laatat

Betonirakenteiden liimausvahventamisohjeet, TIEH 200013-07 (TIEH 200013-v-07 pdf)

Betonirakenteiden liimausvahventamisohjeet -julkaisua käytetään siltojen betonirakenteiden vahventamisen suunnittelussa ja vahventamistyön toteuttamisessa.

Ohjeissa annetaan liimausvahventamiseen liittyviä suunnitteluohjeita taivutus- ja leikkausvahventamiseen lähinnä palkeille ja laatoille, kun vahventamismateriaalina käytetään teräslevyjä tai tarkoitukseen sopivaa hiilikuitumateriaalia. Lisäksi annetaan ohjeita betonirakenteen kunnon ja sen testausmenetelmien sekä vahventamistyön toteuttamisen suhteen. Ohjeet täydentävät materiaalikohtaisia ohjeita ja muita Tiehallinnon suunnitteluohjeita.

Yksikön päällikkö
Asiantuntijapalvelut
Tekniset palvelut



Matti Piispanen

Kehittämispäällikkö
Siltatekniikka, rakentaminen



Jouko Lämsä

LISÄTIETOJA

Timo Tirkkonen
Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut, siltatekniikka
Puh. 0204 22 2486

JAKELU/MYYNTI

Edita Prima Oy
Sähköp. asiakaspalvelu.prima@edita.fi
Puh. 020 450 011 ja Fax. 020 450 2470

JAKELU

Raimo Tapio
Matti Piispanen
Tiepiirit
Tiepiirien siltainsinöörit
ATP, hankintatiimi
ATP, tietekniikka
ATP, siltatekniikka, tekninen henkilökunta
ATT, tiestötietojen hankintatiimi
Kirjasto, 2 kpl
Tiehallinnon ulkopuolinen jakelu / luettelo

ALKUSANAT

Teräslevyjen liimausta siltojen betonirakenteiden vahventamiseen on käytetty Suomessa 1980-luvulta alkaen. Menetelmän käyttö yleistyi 1990-luvulla palkkirakenteiden vahventamisessa. Teräslevyliimauksen rinnalle on viime vuosina tullut samaa periaatetta noudattava hiilikuitunauhojen liimaus.

Vahvetamissysteemien laadun ja toimivuuden takaamiseksi tarvitaan ohjeita ja laatuvaatimuksia sekä vahventamisen suunnitteluun että vahventamistyön toteuttamiseen. *Betonirakenteiden liimausvahventamisohje* on tarkoitettu suunnittelu- ja työhjeeksi käytettäessä teräslevyä tai hiilikuitumateriaalia siltojen betonirakenteiden vahventamisessa. Julkaisussa on esitetty laatuvaatimuksia koskien vahvennettavan rakenteen kuntoa, vahventamissysteemin suunnittelu- perusteita sekä materiaalin ja vahventamistyön laadunvarmistusta.

Julkaisun laatiminen sai alkunsa vuonna 1998 Tielaitoksen Siltayksikön tilauksena VTT Rakennustekniikassa tehdystä betonisiltojen hiilikuituvahventamista koskevasta tutkimuksesta, jota jatkettiin vuosina 2000 - 2001 tämän liimausvahventamisohjeen laatimisena. Tässä yhteydessä ohjeesta laadittiin koeversio.

Koeversion pohjalta saatujen kokemusten ja kommenttien perusteella on julkaisu muotoiltu lopulliseen muotoon. Toimitustyön on tehnyt Ramboll Finland Oy. Työn ohjausryhmään ovat kuuluneet Tiehallinnon Siltatekniikan edustajina Timo Tirkkonen (pj.), Esko Palmu ja Olli Pyykönen sekä Ilkka Vilonen (Ramboll Finland Oy) ja Esko Nikkola (Liimakon Oy)

Helsingissä tammikuussa 2007

Tiehallinto
Asiantuntijapalvelut

SISÄLTÖ

ALKUSANAT	5
SISÄLTÖ	7
1 JOHDANTO	9
1.1 Soveltamisala	9
1.2 Vahventamiskohteet	9
1.3 Liimausmenetelmät	10
1.4 Onnistuneen liimausvahventamisen edellytykset	11
1.5 Vahventamismenetelmän pitkäaikaiskestävyys	12
2 BETONIRAKENTEEN KUNTOVAATIMUKSET	13
2.1 Tartuntavetolujuus	13
2.2 Karbonatisoituminen ja kloridit	13
2.3 Raudoitteiden korroosio	14
2.4 Halkeamat	14
2.5 Vahvennettava betonipinta	14
2.6 Vedeneristyksen vauriot	14
2.7 Korjaus- ja vahventamismenetelmien yhteensopivuus	14
3 VAHVENTAMISMATERIAALIT	15
3.1 Yleistä	15
3.2 Teräslevyjen liimaaminen	15
3.2.1 Teräs	15
3.2.2 Puristusliimaus	16
3.2.3 Injektointiliimaus	16
3.3 Hiilikuidun liimaaminen	16
3.3.1 Hiilikuitutuotteet	16
3.3.2 Hiilikuitunauhojen puristusliimaus	17
3.3.3 Hiilikuidun muita liimaustapoja	18
3.4 Muut vahventamismateriaalit	18
3.5 Pultit	18
3.6 Pinnoitteet ja suojakerrokset	18
4 MITOITUS	19
4.1 Mitoitusperusteet	19
4.2 Kuormat ja kuormien yhdistely	21
4.3 Materiaalien suunnitteluarvot	21
4.4 Palkkien vahventaminen taivutukselle	21
4.4.1 Vahvennetun palkin murtumistavat	21
4.4.2 Murtotilatarkastelut	22
4.4.3 Käyttötilatarkastelut	25
4.5 Laattojen vahventaminen taivutukselle	26
4.6 Palkkien vahventaminen leikkaukselle	26
4.7 Vahvikkeiden ankkurointikapasiteetti	27

5	RAKENTEELLISET OHJEET	28
6	VAHVENTAMISTYÖ	29
6.1	Puristusliimaus teräslevyillä	29
6.2	Puristusliimaus hiilikuidulla	31
6.3	Injektointiliimaus teräslevyillä	32
6.4	Vahventamistyön raportointi	33
7	TUTKIMUKSET	34
7.1	Sillan erikoistarkastus	34
7.2	Liimaustyöhön liittyvä testaus ja mittaukset	35
7.3	Testaukset vahventamisen jälkeen	35
8	VAHVENTAMISSUUNNITELMAN ESITTÄMINEN	36
	SYMBOLILUETTELO	37
	LÄHDELUETTELO	40

1 JOHDANTO

1.1 Soveltamisala

Tätä julkaisua sovelletaan siltojen betonirakenteiden vahventamisen suunnittelussa ja vahventamistyön toteuttamisessa. Julkaisussa annetaan liimausvahventamiseen liittyviä suunnitteluohjeita taivutus- ja leikkausvahventamiseen lähinnä palkeille ja laatoille, kun vahventamismateriaalina käytetään teräslevyjä tai tarkoitukseen sopivaa hiilikuitumateriaalia. Lisäksi annetaan ohjeita betonirakenteen kunnan ja sen testausmenetelmien sekä vahventamistyön toteuttamisen suhteen. Julkaisu täydentää materiaaliakohtaisia ohjeita ja muita Tiehallinnon suunnitteluohjeita.

Liimausvahventaminen sisältyy eurooppalaiseen CEN standardiin 1504 Betonirakenteiden korjaus ja suojaus. Standardissa ja siihen liittyvissä tuotestandeissa määritellään käytettävien tuotteiden testausmenetelmät ja niiden hyväksymiskriteerit. Tämän julkaisun tarkoituksena on ohjata standardin mukaisten tuotteiden käytön suunnittelua ja käyttöä siltojen vahventamisessa.

Tässä julkaisussa käsitellyillä liimausvahventamismenetelmillä otetaan vastaan rasituksia lähinnä rakenteen lyhytaikaisesta hyötykuormasta (sillalla mm. liikennekuorma) ja rakenteen vahventamisen yhteydessä muuttuvasta pitkäaikaisesta kuormituksesta (sillan oman painon muutos). Mikäli rakenteen oman painon tai hyötykuorman pitkäaikaisosuuden nousu on merkittävää tai rakenteen pysyvän kuorman aiheuttamia rasituksia halutaan liimausvahventamisella pienentää, tulee liimausvahvikkeet jännittää erityisillä ankkurointikappaleilla liimaliitoksen virumisen estämiseksi. Jännittämiseen soveltuvia vahventamissysteemeitä ja vaatimuksia ei ole tässä julkaisussa esitetty ja ne tulee määrittää erikseen.

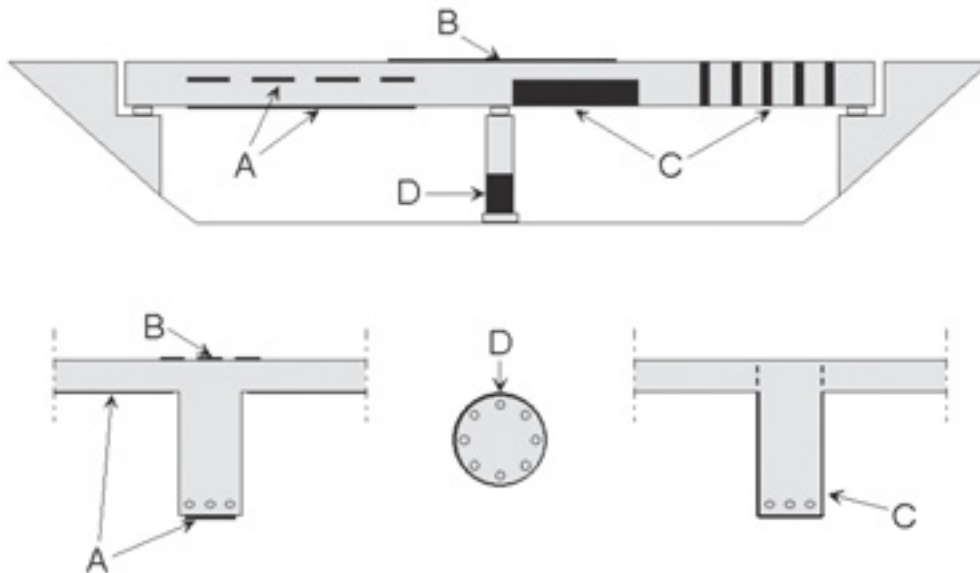
Käytettäessä tässä esiteltyjä vahventamismenetelmiä muissa kuin esitellyissä siltasovelluksissa, on vahventamismenetelmän lisävaatimukset mm. kuormituksen suhteen määritettävä erikseen.

Rautatiealueilla sijaitsevien siltojen vahventamissuunnitelmat hyväksyy Ratahallintokeskus (RHK) tai sen hyväksymä toimija, jotka voivat myös antaa lisävaatimuksia ja –ohjeita tähän julkaisuun. Lisäohjeet voivat koskea mm. vahvikkeiden maadoittamista ja suojaamista.

1.2 Vahventamiskohteet

Siltojen betonirakenteita voidaan vahventaa liimaamalla betonin pintaan vetoa kestäväää vahventamismateriaalia, jonka päätarkoituksena on lisätä betonipoikki-leikkauksen vektoroiditusta. Menetelmällä voidaan parantaa mm. rakenteen taivutus- ja leikkauskestävyyttä. Lisäksi vahventamista voidaan tehdä sekä murtorajatilalla että eri käyttörajatila-alueiden, kuten taipuman ja halkeilun suhteen. Vahvennettavat rakenteet voivat olla mm. palkkeja, laattoja ja pilareita. Liimaamalla voidaan lisätä myös puuttuvaa raudoitusta. Esimerkkejä eri vahventamiskohteista ja -tavoista esitetään kuvassa 1.

Vahventamismateriaaleina voidaan käyttää lähinnä teräslevyjä ja –profileja tai hiilikuitu- ja muita komposiittimateriaaleja, joita on saatavissa sekä nauha- että kangastyypisinä. Tässä julkaisussa rajoitutaan kuitenkin pelkästään teräslevy- ja hiilikuituvahvikkeiden käyttöön.



Kuva 1. Betonisillan liimausvahventamistapoja (A taivutuksen suhteen kentässä ja B välituella, C leikkauksen suhteen kentässä ja D pilarin vahventaminen).

1.3 Liimausmenetelmät

Liimausvahventamisessa voidaan käyttää vahventamismateriaalista riippuen eri liimausmenetelmiä. Näitä ovat esimerkiksi:

- Puristusliimaus, jossa liima levitetään määrätyn paksuisena kerroksena sekä betonipintaan että vahventamismateriaaliin, joka puristetaan betonipintaan kiinni. Voidaan käyttää sekä teräslevyille että nauhamaisille komposiittituotteille.
- Injektointiliimaus, jossa vahventamismateriaali (teräslevy) tuetaan paikalleen määrätyle etäisyydelle betonipinnasta. Teräslevyn ja betonipinnan välinen rako injektoidaan liimalla umpeen.
- Laminointiliimaus, jossa kangasmaisia komposiittituotteita käytettäessä tehdään matriisi työmaalla laminoimalla se useasta kangas- ja liimakerroksesta.

Kussakin liimausmenetelmässä vaaditaan käytettävältä liimalta eri ominaisuuksia. Valittavan liimausmenetelmän kanssa yhteensopivan liiman valintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Liimaliitoksen lisäksi voidaan vahventamismateriaali joutua kiinnittämään päistään mekaanisesti betonirakenteeseen riittävän ankkurointipituuden saavuttamiseksi ja vahvikkeen pään irtoamisen estämiseksi. Eri valmistajilla voi olla kehitettynä myö muunlaisia menetelmiä.

1.4 Onnistuneen liimausvahventamisen edellytykset

Liimausvahventamisen laadun varmentamiseksi tulee kiinnittää huomiota erityisesti seuraavien osatehtävien laadukkaaseen suorittamiseen:

1. Sillan suunnitelmien paikkansapitävyys

Vahvennettavan sillan tarkastuksiin liittyen tulee todeta, vastaavatko sillan rakenteiden toteutus ja päämitat piirustuksissa annettuja tietoja. Varsinkin vanhemmissa silloissa saattavat todelliset tiedot poiketa merkittävästi suunnitelmatiedoista. Mikäli eroavaisuuksia havaitaan, tehdään vahventamissuunnittelu todellisten tietojen perusteella.

2. Betonirakenteen riittävä kunto

Betonirakenteelle suoritetaan erikoistarkastus, jonka perusteella tehdään päätös rakenteen soveltumisesta liimaamalla vahvennettavaksi ja määritetään tarvittavat muut korjaustoimenpiteet. Tärkeimmät vaatimukset ovat, ettei raudoituksessa ole käynnissä olevaa korroosiota ja että betonipinnalla on riittävä tartuntavetolujuus. Katso tämän julkaisun luku 2.

3. Vahventamismateriaalien valinta

Vahventamismateriaalien valinta tulee tehdä vahventamistarpeesta riippuen. Vahventamismateriaalien ominaisuuksista ja niiden sopivuudesta vahventamiskohteeseen tulee olla materiaalivalmistajan antamat aineodistukset ja muut tarvittavat tiedot sekä mielellään riittävä käyttökokemus. Uusien materiaalien ja materiaaliyhdistelmien osalta edellytetään materiaali- ja menetelmäkokeita riittävässä laajuudessa. Katso tämän julkaisun luku 3.

4. Vahventamismitoitus kaikkien kriittisten tekijöiden suhteen

Vahventamismitoituksessa tarkasteltavia asioita ovat mm. oikea kuormataso ja kuormien yhdistely, taivutetun poikkileikkauksen mitoitus sekä veto- että puristuspuolella sekä riittävän ankkuroinnin varmistaminen vahvikkeelle. Katso tämän julkaisun luku 4.

5. Rakenteelliset ohjeet

Eri vahventamismateriaaleille on annettu erityisohjeita mm. niiden poikkileikkauksmittojen ja peitettävän pinta-alan suhteen. Katso tämän julkaisun luku 5.

6. Liimausolosuhteet

Lämpötila- ja kosteusolosuhteiden pitää olla materiaaleille ja liimaustyölle annettulla alueella. Epoksiliimoja käytettäessä lämpötilan liiallinen nousu esim. eristys- ja päällystystöistä johtuen kannen yläpintaa vahvennetaessa tulee estää. Myös liian suuri kosteus vaikuttaa liiman tarttuvuuteen. Lämpötilan liimattavalla pinnalla pitää olla 3 °C kastepisteen yläpuolella. Liikenne voi aiheuttaa rakenteeseen muodonmuutoksia ja tärinää, mikä vaikuttaa liimaustyön onnistumiseen. Vaikutusta voidaan pienentää nopeusrajoituksella ja tarpeen vaatiessa raskasta liikennettä rajoittamalla. Katso tämän julkaisun luku 6.

7. Pintojen esikäsittely ennen liimaustyötä

Liiman tartunnan takaamiseksi on betonin ja vahventamismateriaalin pinnat käsiteltävä ennen liiman levittämistä annettujen ohjeiden mukaisesti. Katso tämän julkaisun luvut 3 ja 6.

8. Liimaustyön suorittaminen

Liimaustyö suoritetaan ensisijaisesti liiman toimittajan antamien ohjeiden mukaisesti mm. liiman sekoituksen, levityksen, avoimen ajan ja kovettumisajan suhteen. Katso tämän julkaisun luku 6.

9. Kokeet ja testit

Vahventamistyön laadun varmentamiseksi tulee betonin kunnan testaamisen lisäksi suorittaa kokeita liiman lujuuden osalta. Vahvennetun rakenteen kantavuus ja vahventamissysteemin toiminta voidaan todeta myös koekuormituksin ja mittauksin. Katso tämän julkaisun luku 7.

1.5 Vahventamismenetelmän pitkäaikaiskestävyys

Edellä mainittuja kohdan 1.4 toimenpiteitä noudattamalla pyritään takaamaan vahventamismenetelmälle n. 30 – 35 vuoden käyttöikä, mikä vastaa sillan peruskorjausväliä ja mm. reunapalkkien ja liikuntasauvojen käyttöikää. Menetelmän pitkäaikaistoimivuudesta tulevaisuudessa saatavan kokemuksen perusteella voitaneen suunniteltua käyttöikää näistä arvoista tarkentaa.

Teräslevyjä käytettäessä voi korroosion kehittyminen teräslevyn ja liimasauman välissä rajoittaa vahventamismenetelmän käyttöikää. Korroosiota on odotettavissa varsinkin puristusliimauksella toteutetuissa kohteissa johtuen käytettävän liiman huokoisuudesta, joka mahdollistaa kosteuden kulkeutumisen liimasaumaan. Injektointiliimauksessa käytetty injektointiepoksi muodostaa sen sijaan hyvin kosteutta eristävän tiiviin kerroksen. Myös teräslevyn pinnoitteen ehyt jatkuminen liimasaumaan saakka pitäisi varmistaa.

Hiilikuituvahvikkeilla ei korroosiota tapahdu. Vahvennuksen ollessa välittömästi ultravioletisäteilylle alttiina se on suojattava säteilyltä materiaalin toimittajan ohjeiden mukaan. Myös voimakkaalla suolarasituksella voi olla vaikutusta sekä hiilikuitu- että lasikuitutuotteen pitkäaikaiskestävyyteen. Vahventamismateriaali on tällöin suositeltavaa suojata tarkoituksenmukaisella tavalla.

Vahventamissysteemin käyttöikään vaikuttavat mm. vahventamisen yhteydessä tehtävät muut korjaustoimenpiteet ja sillan kunnossapito. Keskeinen tekijä on liimauspinnan betonin kunto ja sen mahdolliset muutokset vahvennetun rakenteen käyttöaikana. Esim. vesivuodot vahvennettuun rakenteeseen tulisi estää. Tämä edellyttää sillan vedeneristyksen ja liikuntasauvalaitteiden pitämistä kunnossa.

Väsymiskestävyys on liimaliitoksilla yleisesti hyvä. Liimasauman osalta ei tarvitse tutkia väsymistä. Mikäli teräslevyjen jatkoksissa käytetään päittäishitsiliitoksia, on niiden väsymiskestävyys varmistettava. Päittäisjatkoksien tekemistä lähelle leveitä taivutus- tai leikkaushalkeamia on vältettävä.

2 BETONIRAKENTEEN KUNTOVAATIMUKSET

Tärkeimmät vaatimukset vahvennettavalle betonirakenteelle ovat betonipinnan riittävä tartuntavetolujuus sekä varmuus siitä, ettei raudoitteiden korroosio tai betonin pakkasvaurio tule irrottamaan betonipintoja rakenteen suunnitellun käyttöajan aikana. Näillä taataan liimausvahvikkeiden kiinnipysyminen betonirakenteen osalta. Sillalle tehtäviä tutkimuksia on esitetty luvussa 7.

2.1 Tartuntavetolujuus

Tartuntavetokokeilla mitatun betonin pintaosan tartuntavetolujuuden minimiarvo-vaatimus on 1,5 N/mm².

Mikäli betonipinnan lujuus on laskenut esim. pakkasrapautumisen johdosta tai siinä on alkavia lohkeamia, on huonokuntoinen betoniaines poistettava ja paikkaus tehtävä SILKO ohjeen 2.231 mukaisesti. Tällöin edellä esitetty lujuusvaatimus koskee myös betonipinnan korjauksia.

2.2 Karbonatisoituminen ja kloridit

Betonipeitteen karbonatisoituminen ja kloridit eivät rakenteen käyttöaikana saa edetä uloimpien raudoitteiden tasalle (esim. hakaterästanko).

Betonin kloridipitoisuus ei saa ylittää normaaliraudoitettussa betonirakenteessa raudoituksen tasolla arvoa 0,07 % betonin painosta happoliukoisena mitattuna. Jos arvot ovat tätä korkeampia, korvataan kloridipitoinen betoni uudella. Mikäli liimausvahventamisen pitkäaikaiskestävyys halutaan taata, tulisi kuitenkin noudattaa jonkin verran tiukempia kriteereitä, esim. arvoa 0,03 % betonin painosta.

Kun tiedetään sillan ikä, betonipeitteen paksuudet, karbonatisoitumissyvyys ja kloridin tunkeutumissyvyys, voidaan karkeasti arvioida, missä vaiheessa betoniraidotteiden korroosio alkaa. Tätä aikaa voidaan verrata korjauksen tavoitekäyttöikänsä (esim. 20 - 50 vuotta). Tämä tarkoittaa normaalisti suositusarvona noin 10 mm tervettä betonipeitettä. Karbonatisoitumis- ja kloridien tunkeutumissyvyyden ulottuessa lähemmäs teräksiä tarvitaan erikoistoimenpiteitä.

Samalla tulee kuitenkin kiinnittää huomiota siihen, ettei kosteus kerääny betoniin vahvikkeen sisäpintaan (esim. laattojen halkeamien kautta). Tällöin voi toistuva jäätymis-sulamisrasitus vaurioittaa betonia ja irrottaa paikallisesti liimausvahvikkeen.

Karbonatisoitumisen ja kloridien etenemisen hidastamiseksi on kehitetty pinnoitteita ja kloridien etenemisen hidastamiseksi erilaisia impregnointiaineita. Korjaustyössä on tällöin käytettävä Tiehallinnon käyttöönsä hyväksymiä aineita.

Kloridien tunkeutumista betoniin voidaan hidastaa myös huolehtimalla sillan kannen vedeneristyksen ja liikuntasaumalaitteiden kunnosta ja sekä injektoimalla halkeamia umpeen.

2.3 Raudoitteiden korroosio

Ennen liimausvahventamista tulee raudoitustankojen ruoste poistaa, tangot käsitellä korroosionestolaastilla ja betonipinnat paikata. Laajat korjaukset voivat johtaa uuden betonikerroksen ja edelleen liimatun vahvikkeen irtoamiseen. Tämä voidaan estää ulottamalla uuden betonin sauma raudoitteiden taakse tai ankkuroimalla vahvike mekaanisesti. Paikallisesti voidaan ruostunutta raudoitteiden poikkileikkausalaa korvata liimausvahvikkeiden tuomalla lisäalalla.

Teräskorroosiovaurioiden paikkauksien tartuntavetolujuudet on pistokoeluoonteisesti testattava koevedoilla, minimivaatimus tartuntavetolujuudelle on 1,5 N/mm². Kokeita tehdään 3 kpl, kuitenkin vähintään 1 koe/50 m².

2.4 Halkeamat

Vahvennettaessa sillan betonirakennetta pelkästään taivutukselle ei rakenteessa saa olla leveää leikkaushalkeilua vahvikkeiden liimausalueella. Taivutushalkeilun osalta voidaan soveltaa normaaleja halkeamaleveyskriteereitä (B4 /5/). Yli 0,2 mm leveät halkeamat on injektoitava voimia siirtäviksi SILKO 2.236 mukaan.

2.5 Vahvennettava betonipinta

Sallittavat epätasaisuudet riippuvat vahventamismateriaalista ja ne on annettu materiaalivalmistajien ohjeissa. Mikäli tarkempia ohjeita ei ole annettu, voidaan tasaisuusvaatimuksina käyttää arvoa 5 mm 2,0 m:n matkalla ja 2 mm 0,3 m:n matkalla. Nystyrät hiotaan pois.

Mikäli vahvennettava betonipinta on käsitelty epoksisivellyllä, tulee pinnoite poistaa liimausvahvikkeen alta.

2.6 Vedeneristyksen vauriot

Ennen kannen yläpinnan liimausvahventamista on sillan vedeneristyksen kunto tutkittava. Vuotava vedeneristys on uusittava ennen liimausvahventamista vahventamissysteemin pitkäaikaiskestävyyden takaamiseksi.

2.7 Korjaus- ja vahventamismenetelmien yhteensopivuus

Valittavien betonipintojen korjausmenetelmien sopivuutta liimausvahventamismenetelmän kanssa tulee tarkastella tapauskohtaisesti.

3 VAHVENTAMISMATERIAALIT

3.1 Yleistä

Liimausvahventamisessa on keskeistä valita sovellettavaan liimaustekniikkaan yhteensopiva vahvike-liima – yhdistelmä. Tämän vuoksi vahventamisessa käytettävät materiaalit esitellään menetelmäkohtaisesti. Tarkemmin on esitelty kolme vahventamismenetelmää, jotka ovat:

- teräslevyjen liimaaminen puristusliimauksella,
- teräslevyjen liimaaminen injektointiliimauksella sekä
- hiilikuitunauhojen liimaaminen puristusliimauksella.

Materiaaleille annetaan seuraavassa menetelmäkohtaisia vaatimuksia. Mikäli halutaan käyttää muita kuin edellä mainittuja liimausmenetelmiä, ovat materiaali-vaatimukset ja materiaalien yhteensopivuus määritettävä erikseen materiaali-toimittajan antamien tietojen perusteella ja tarvittaessa menetelmäkokein.

3.2 Teräslevyjen liimaaminen

3.2.1 Teräs

Liimausvahventamisessa voidaan vahventamismateriaalina käyttää yleisiä kuumavalssattuja rakenneteräksiä. Liimausvahventamiseen soveltuvia rakenneterästen lujuusluokkia ovat esim. S235, S275 ja S355. Tarkemmat materiaali-vaatimukset ja niitä vastaavat merkinnät määritetään mm. hitsattavuuden suhteen erikseen. Ruostumattoman teräksen käyttö vahvikelevynä ei ole suositeltavaa normaaliterästä huonomman tartunnan vuoksi, ellei ennakkokokein ole varmennettu liiman tartuntaa vahvikelevyyn. Käytettävän teräksen piipitoisuuden tulee olla 0,15 – 0,22 %.

Korkeampi teräslujuus parantaa rakenteen murtokestävyyttä edellyttäen, että teräslevyn tartunta ja ankkurointi sekä betonipinnan tartuntavetolujuus ovat riittäviä. Haluttaessa nimenomaan jäykistää rakennetta voi alhainen teräslujuus osoittautua kuitenkin edullisemmaksi suuremman teräksen poikkileikkausalan takia.

Teräksen ominaislujuutena käytetään teräksen ylempää myötörajaa. Materiaalin osavarmuuskertoimena käytetään teräkselle B7 /6/ rakenneluokan 1 mukaisista kuumavalssatun teräksen arvoa $\gamma_m = 1,10$. Teräksen kimmomoduulille käytetään arvoa 210 000 N/mm².

Teräslevy on suojattava korroosiolta. Korroosiosuojauksena toimii parhaiten kuumasinkitys.

Teräs voidaan korroosiosuojata myös maalaamalla näkyvältä pinnaltaan. Pintakäsittelyn vaatimukset on annettu Sillanrakennustöiden yleisissä laatuvaatimuksissa, osassa Teräsrakenteet (SYL 4 /7/).

Ennen liimausta liimattava teräspinta on puhdistettava suihkupuhdistuksella (standardi SFS-EN ISO 8504, /8/) valssihilseestä, ruosteesta ja vieraasta aineksesta. Standardin SFS-EN 1150/12944-4 /9/ mukainen standardiesikäsittelyaste on Sa2½. Mikäli liimattava teräspinta on kuumasinkitty, poistetaan liimapinnasta suihkupuhdistuksella vähintään 50% sinkistä tehdastyönä. Välittömästi suihkupuhdistuksen jälkeen poistetaan pöly. Tämän jälkeen suojataan teräslevy korroosiolta esim. liimausjärjestelmään kuuluvalla primerilla tai suoritetaan pyyhkäisy-suihku-puhdistus ennen liimaustyötä.

3.2.2 Puristusliimaus

Puristusliimauksessa käytetään useimmiten tiksotrooppista, kaksikomponenttista epoksiliimaa, joka sisältää epoksia ja kovetinta. Lisäksi liimaan on usein lisätty täyteainetta lämpötilamuutosominaisuuksien parantamiseksi.

Liimalla tulee olla riittävä tartunta ja leikkauslujuus. Liiman lämpölaajenemiskerroin ja muut fysikaaliset ominaisuudet eivät saa olla sellaisia, että ne aiheuttavat tartunnan heikentymistä.

Liiman käytön yhteydessä on noudatettava valmistajan ohjeita vahventamismateriaalin esikäsittelystä, kuten teräslevyn korroosionestokäsittelystä, mahdollisen primerin käytöstä ja materiaalin puhdistamisesta ennen liimausta.

Liiman materiaalitestit on määritetty standardissa prEN 1504 - 4 /10/ "Structural Bonding" sekä erillisissä kutakin testiä vastaavassa standardissa.

3.2.3 Injektointiliimaus

Injektointiliimauksessa käytetään yleisesti samantyyppisiä injektointiepokseja kuin betonirakenteiden halkeamien injektoinnissa. Ne ovat kaksikomponenttisia sisältäen puhdasta epoksia ja kovetinta.

Injektointiin voidaan käyttää epoksia, jonka käytöstä on riittävästi käytännön kokemusta. Injektointiepoksin laadun varmistamisessa voidaan soveltaa standardin prEN 1504 - 4 /10/ mukaisia menetelmiä. Liimasauman suositeltava paksuus on 1...2 mm.

Injektointiepoksi suojaa tiiviinä aineena teräksen pinnan korroosiolta.

3.3 Hiilikuidun liimaaminen

3.3.1 Hiilikuitutuotteet

Liimausvahventamisessa voidaan käyttää hiilikuitua, jonka kimmomoduuli on samaa luokkaa kuin teräksellä. Käytettävien hiilikuitutuotteiden kimmomoduuli vaihtelee välillä 150 000 - 300 000 N/mm². Hiilikuidun murtolujuus on korkeampi kuin teräksellä, tyypillisimmillä tuotteilla välillä 1000 - 3000 N/mm². Erona teräkseen verrattuna on plastisen alueen puuttuminen jännitys-venymä-kuvaajasta, joka on lineaarinen hiilikuidun murtolujuuteen saakka.

Hiilikuidusta voidaan valmistaa erilaisia tuotteita, joissa kuidut on sidottu eri menetelmillä toisiinsa. Eniten käytetyt tuoteryhmät ovat:

- hiilikuitunauhat, joissa yhdensuuntaiset kuidut on sidottu toisiinsa epoksi-pohjaisella matriisilla, ja
- hiilikuitukankaat, joissa kuidut on kudottu kahteen suuntaan 90°:n kulmassa toisiinsa.

Vahventamiseen käytettävät hiilikuitunauhat ovat tyypillisesti leveydeltään 50 – 150 mm ja paksuudeltaan 1,0 - 1,5 mm. Myös paksumpia hiilikuitutuotteita on saatavilla. Kankaat ovat hyvin ohuita, mutta niitä voidaan tarvittaessa liimata useita päällekkäin.

On huomattava, että hiilikuitutuotteella on korkea lujuus vain kuitujen suunnassa. Tarvittaessa vahventamismateriaalille lujuutta kahdessa suunnassa (esim. laatat) on käytettävä joko kuituja kahdessa suunnassa sisältävää kangasta tai liimattava yhdensuuntaisia kuituja sisältäviä nauhoja kahteen suuntaan.

Hiilikuitutuotteiden materiaaliominaisuudet saadaan yleisesti materiaalitointien antamista tiedoista. Kankaan osalta tärkein ominaisuus on toimiva tehollinen kuidun pinta-ala kankaan kummassakin suunnassa.

Hiilikuitutuotteen laskentalujuus voidaan määrittää murtolujuuden perusteella, kun materiaalin osavarmuuskertoimelle käytetään arvoa $\gamma_{ch}=1,50$.

Hiilikuituvahvikkeiden lämpölaajenemiskerroin on hyvin lähellä nollaa. Hiilikuidun betonista poikkeavan lämpökäyttäytymisen ei ole todettu normaalisti käytetyillä ohuilla vahvikepaksuuksilla aiheuttavan ongelmia.

Kankaita käytettäessä tulee varmistaa kosteuden ulospääsy rakenteesta. Tämä edellyttää esim. laattojen, palkkien sivupintojen ja seinien osalta korkeintaan 1/3 pinnan peittämistä.

Hiilikuitu on arka mekaanisille vaurioille, esimerkiksi viillot katkaisevat hiilikuitusäikeitä helposti. Tarvittaessa kuitu voidaan suojata esimerkiksi laastikerroksella tai erillisellä törmäyssuojalla.

Hiilikuitunauhan epoksimatriisin pitkäaikaiskestävyyden varmentamiseksi on hiilikuitunauhat tarvittaessa suojattava suoralta UV-säteilyltä (auringon valolta) käyttäen UV-käsittelyä tai suojalevyjä. Sopiva menettely valitaan hiilikuitumateriaalin toimittajan ohjeiden mukaan.

3.3.2 Hiilikuitunauhojen puristusliimaus

Puristusliimauksessa käytetään useimmiten tiksotrooppista, kaksikomponenttista epoksiliimaa, joka sisältää epoksia ja kovetinta. Lisäksi liimaan on lisätty täyteainetta lämpötilamuodonmuutosominaisuuksien parantamiseksi.

Liimalla tulee olla riittävä tartunta- ja leikkauslujuus. Liiman lämpölaajenemiskerroin ja muut fysikaaliset ominaisuudet eivät saa olla sellaisia, että ne aiheuttavat tartunnan heikentymistä.

Liiman käytön yhteydessä on noudatettava valmistajan ohjeita vahventamismateriaalin esikäsitteystä, kuten materiaalin puhdistamisesta ennen liimausta.

Liiman materiaalitestit on määritetty standardissa prEN 1504 - Osa 4 *“Rakenteellinen liimaus” /10/* sekä erillisissä kutakin testiä vastaavassa standardissa.

3.3.3 Hiilikuidun muita liimaustapoja

Kuitukankailla suoritettavassa vahventamisessa käytetään useimmiten epoksihartsia. Laminointiliimauksen materiaalivaatimukset tulee selvittää erikseen.

Betonipintaa vastaan kohtisuoraan tehtyyn uraan liimattavia hiilikuitunauhoja on myös kehitetty. Käytettävät materiaalit ja työtavat tulee selvittää erikseen.

3.4 Muut vahventamismateriaalit

Muita liimausvahvikkeiksi soveltuvia materiaaleja voivat olla esim. erilaiset lasikuitu- ja muovituotteet. Näiden soveltuvuus kuhunkin vahventamiskohteeseen tulee varmistaa erikseen. Keskeisiä asioita ovat oikeiden materiaalisuureiden selvittäminen, materiaalien vaikutus mitoitukseen, vahventamissysteemin eri komponenttien yhteensopivuus sekä pitkäaikaiskestävyys. Uusien tuotteiden osalta ovat etukäteen suoritettavat riittävän laajat materiaali- ja menetelmäkokeet välttämättömiä. Tätä ohjetta ei voi käyttää näiden vahvikkeiden suunnitteluun.

3.5 Ruuvit

Mikäli teräslevyn päähän syntyviä, liimasaumaan nähden kohtisuoria jännityksiä ei mitoituksessa tarkastella tai huomioida jäljessä menetellyn tavoin, on levyn pään kiinnitysminen alustassa varmennettava varustamalla levyn pää kahdella kiinnitysruuvilla.

Ruuveja varten levyn päähän tehdään pitkänomaiset reiät, jotka eivät saa estää levyn pituussuuntaisia liikkeitä. Ruuvit kiristetään liiman kovetuttua tavallisen ruuviliitoksen mukaisella esijännitysvoimalla /7/.

Ruuvien käyttö voidaan välttää ulottamalla vahvikelevy alueelle (esim. lähelle tukea), jossa taivutusmomentti ulkoisista kuormista on riittävän pieni. Jatkuvilla silloilla on suositeltavaa ulottaa taivutusvahvikkeet taivutusmomentin nollakohdan oman painon suhteen ja yksiaukkoisilla silloilla mahdollisimman lähelle tukea.

Käytettävien ruuvien pitää olla korroosiosuojattuja. Korroosiosuojausta valittaessa tulee ottaa huomioon yhteensopivuudet teräslevyn, sen korroosiosuojauksen ja muiden materiaalien kanssa. Ruostumattomien ruuvien käyttö yhdessä rakenneteräksisen vahvikelevyn kanssa ei ole hyväksyttävää.

3.6 Pinnoitteet ja suojakerrokset

Liimausvahvikkeet voidaan suojata pinnoituksella tai paksummalla suojakerroksella mm. ilkeältä, törmäyksiä, lämmön nousua tai UV-säteilyä tai voimakasta

suolarasitusta vastaan. Kuhunkin käyttötarkoitukseen soveltuvat materiaalit, niiden kerrospaksuudet ja käytettävät työmenetelmät on määritettävä erikseen vahventamissuunnittelussa ja raportoitava vahventamistyön laaturaportissa.

Tiesillan yläpintaa vahvennettaessa tarvitaan sekä teräs- että hiilikuituvahvikkeille suojakerros päällystys -ja vedeneristystöiden aiheuttamaa liiman lämmön nousua vastaan. Lämpösuojamassaksi soveltuva laasti ja sen paksuus on selvitettävä liimatoimittajalta. Laastin paksuudeksi suositellaan 15 mm.

Käytettävät työmenetelmät on määrättävä vahventamissuunnitelmassa. Liiman lasittumislämpötilan tulisi olla $\geq 60^{\circ}\text{C}$, johon liiman lämpötila ei saa nousta. Lämpötiloja on suositeltavaa seurata mittauksin eristystyön ja asfaltoinnin aikana.

4 MITOITUS

4.1 Mitoitusperusteet

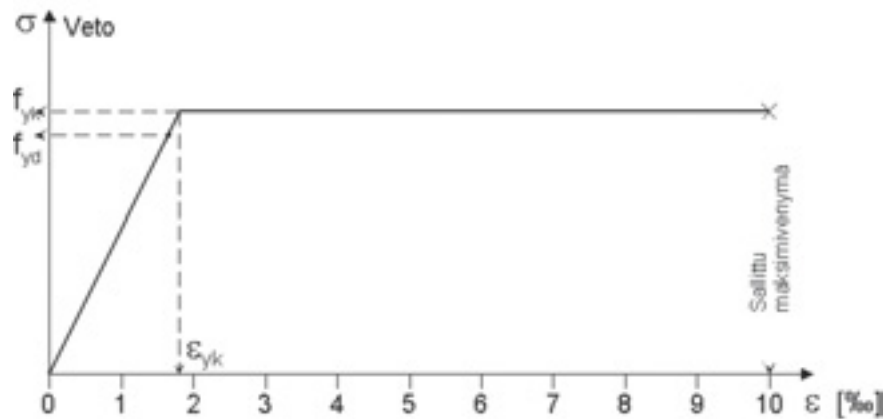
Liimausvahventamisen mitoituksen pääperiaatteet ovat seuraavat:

- Vahventamisella sallitaan nostaa päällysrakenteen poikkileikkauksen pääsuunnan taivutuskapasiteettia korkeintaan 50 %.
- Voimasuureet lasketaan kimmoteorian mukaan rakenteen nimellisillä mitoilla (ks luku 1.4/kohta 1.).
- Poikkileikkausten oletetaan säilyvän tasoina taivutuksessa.
- Liimasauman muodonmuutosta ei oteta huomioon.
- Betonin ja raudoitteiden oletetaan toimivan kuten teräsbetonirakenteiden suunnittelussa yleensä. Jännitys-muodonmuutos – kuvaajat betonille ja betoniteräkselle on esitetty betoninormeissa /5/.
- Betonin vetolujuutta ei oteta huomioon. Betonin murtopuristuman sallittu maksimiarvo on normaalibetoneilla 3,5 ‰.
- Betonin tehollinen puristusvyöhykkeen korkeus murtotilassa on $0,8x$ (x = puristusvyöhykkeen korkeus).
- Riittävän sitkeyden takaamiseksi hiilikuituvahventamisessa tulee veto puolen raudoitteiden myötä, ennen kuin betoni murtuu puristuspuolelta, venymän tulee olla vähintään 5 ‰.
- Raudoitteiden maksimivenymä saa olla korkeintaan 10 ‰ (kuva 2a).
- Hiilikuituvahvikkeen jännitys-venymä–kuvaaja on lineaarinen (kuva 2b), jännityksen ylärajana on materiaalille määritelty suunnittelulujuus.
- Raudoitteiden tulee myötä ennen kuin hiilikuituvahvike saavuttaa suunnittelulujuutensa.

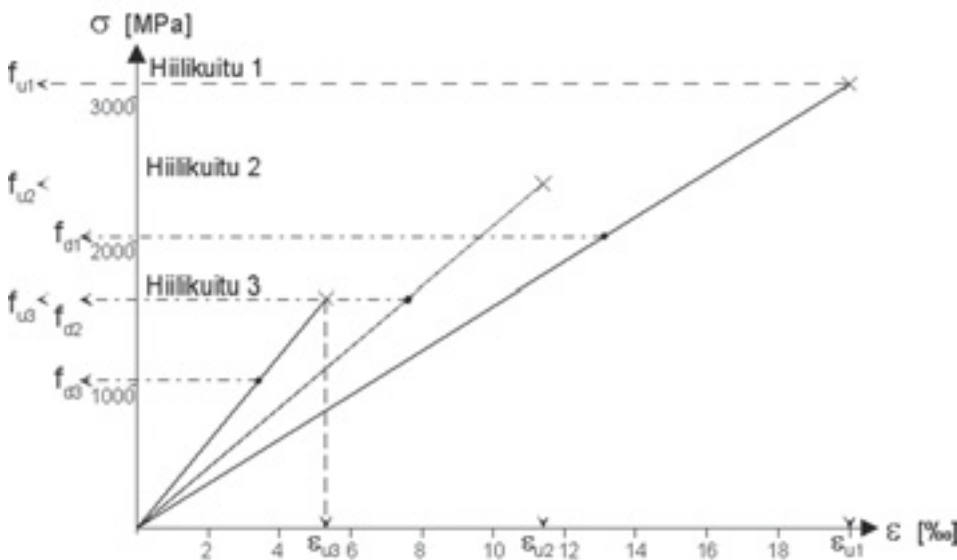
- Halkeamatarkastelussa liimausvahvistus toimii poikkileikkauksen osana.
- Raudoitteiden jännitys ei saa käyttötilassa saavuttaa myötölujuutta.

Kuvassa 2a esitetään vahviketeräslevyn jännitys-venymä – kuvaaja ja kuvassa 2b hiilikuidun jännitys-venymä – kuvaajat kolmelle hiilikuitunauhamaeriallille: hiilikuitu 1 (suuri lujuus, alhainen kimmomoduuli), hiilikuitu 2 (keskimääräiset arvot) ja hiilikuitu 3 (korkea kimmomoduuli, alhainen lujuus).

a)



b)



Kuva 2. Vahventamismateriaalien jännitys-venymä –kuvaajat a) teräkselle ja b) hiilikuidulle.

Vahvennettavan sillan varmuusvaatimukset ilman vahventamissysteemiä määritetään siltakohtaisesti mm. vahvikkeen vaurioitumisriskin ja vaurion vaikutusten perusteella. Yleisesti onnettomuustilanteessa (esim. törmäys tai tulipalo), jossa vahventamissysteemi vaurioituu tai irtoaa, ei rakenne saa muuttua mekanismiksi. Onnettomuustilanteen varalta rakenteen kapasiteetti tarkistetaan ilman vahventamissysteemiä onnettomuustilanteen kuormitukselle.

4.2 Kuormat ja kuormien yhdistely

Vahventamissuunnittelussa käytetään liikennekuormina tapauskohtaisesti joko normaaleja tiesiltojen suunnittelun liikennekuormia /1/ tai kantavuuslaskennassa sovellettavia ajoneuvoasetus- (AA) ja ylliraskaiden erikoiskuljetusten kuormia (EK) /2/ sillalle asetettavien kantavuustavoitteiden mukaisesti. Kuormien yhdistelyn ja kuormien osavarmuuskertoimien osalta noudatetaan myös ohjeita /1/ ja /2/.

Onnettomuustilanteessa (vahventamissysteemin vaurioituessa) kuormitus valitaan vahventamissuunnittelun mitoituskuormasta riippuen siten, ettei vaaraa sillan kapasiteetin ylittämiseksi normaalikuormituksilla (AA, EK-yleiskuljetus) aiheudu.

4.3 Materiaalien suunnittelu-arvot

Suunnittelussa käytettävien vahvikkeiden tärkeimmät materiaaliarvot annetaan koottuna taulukossa 1. Teräslevyjen osalta myötölujuuden f_y arvoja annetaan myös lähteessä /4/. Hiilikuitutuotteiden ja liimojen lujuuden, kimmomoduulin ja tiheyden osalta arvot on määritettävä tuotekohtaisesti. Betonin ja raudoitteiden osalta käytetään B4:ssä /5/ esitettyjä materiaaliarvoja ja sekä betonitutkimuksista saatuja tuloksia.

Taulukko 1. Materiaaliarvoja teräslevylle ja hiilikuidulle.

Suure	Merkintä	Teräslevy	Hiilikuitutuotteet
Osavarmuuskerroin	γ_m	1,1	1,5
Ominaislujuus	f_k	235...355 N/mm ² (myötölujuus)	1600...3100 N/mm ² (murtolujuus)
Kimmomoduuli	E	210 000 N/mm ²	150 000...300 000 N/mm ²
Suppeuskerroin	ν	0,3	Tuotekohtainen
Tiheys	ρ	7850 kg/m ³	1600 kg/m ³
Lämpölaajenemis- kerroin	α_t	$12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	≈ 0

4.4 Palkkien vahventaminen taivutukselle

4.4.1 Vahvennetun palkin murtumistavat

Taivutuskapasiteetin nostamiseksi vahvennetulla betonipalkilla voi olla seuraavia murtumistapoja:

1. Vahvikkeen tai betoniterästangon murtuminen
 - vedetyn teräslevyn myötääminen,
 - hiilikuituvahvikkeen murtuminen tai
 - vedettyjen raudoitteiden murtuminen myötövenymän ylittäessä 10 %.
2. Betonin murtuminen puristuspuolelta.
3. Hiilikuituvahvikkeen irtoaminen leveän leikkaushalkeaman kohdalla.
4. Palkin leikkausmurto vahvikelevyn pään vieressä vahventamattomalla alueella.
5. Vahvikelevyn irtoaminen päästään pintaa vastaan kohtisuorasta irrottavasta voimasta (erityisesti teräslevyt).
6. Vahvikelevyn irtoaminen sen tartunnan tai betonipinnan tartuntavetolujuuden ylittyessä.
7. Vahvikelevyn ja betonipinnan irtoaminen vetoterästankojen pintaa pitkin.

Vahventamissuunnittelussa pyritään saamaan riittävä varmuus kaikkia murtumistapoja vastaan. Murtumistavat 1 ja 2 otetaan huomioon mitoitettaessa vahventamissysteemiä murtotilan mukaan (luvut 4.4.2.1 - 4.4.2.4). Murtumistavat 3 ja 4 ehkäistään tarkistamalla palkin leikkauskapasiteetit vahvennetulla alueella ja vahvikelevyn päässä (luvut 4.4.2.5 ja 4.4.2.6). Murtumistapa 5 otetaan huomioon määrittelemällä vahvikkeelle riittävä ankkurointipituus sekä varustamalla teräslevyjen päät tarvittaessa kiinnityspulteilla. Murtumistapoja 6 ja 7 vastaan varaudutaan laskemalla leikkausjännitys liimapinnassa (luku 4.4.2.7), varmistamalla betonirakenteen riittävä kunto tutkimuksin sekä varmistamalla oikeiden työmenetelmien käyttö mm. vahvikkeiden puhdistamisen osalta.

4.4.2 Murtotilatarkastelut

4.4.2.1 Teräslevy saavuttaa myötölujuuden

Teräslevy saavuttaa myötölujuutensa f_{ydl} ja vastaavan myötövenymän e_{ydl} .

Tällöin taivutuskapasiteetti lasketaan seuraavasti

$$M_u = N_l \cdot z_l + N_s \cdot z_s \quad (1)$$

missä N_l liimausvahvikkeessa vaikuttava vetovoima,
 N_s raudoitteissa vaikuttava vetovoima,
 z_l on teräslevyn etäisyys puristusvyöhykkeen painopisteestä
 z_s on raudoitteen etäisyys puristusvyöhykkeen painopisteestä.

Tarkistetaan betonin reunapuristuma e_{yk} , kun sekä betoniterästangot (tai raudoitteet) että teräslevyt myötäävät (jännitys $\geq f_{yk}$).

4.4.2.2 Hiilikuitu saavuttaa laskentalujuutensa

Hiilikuidun vetojännityksen saavuttaessa ääriarvonsa lasketaan sitä vastaava venymä ja vetovoimaresultantti olettaen, että raudoitteen jännitys on laskentalujuuden suuruinen.

Määritetään puristuspuolen tehollisen korkeuden arvo vaakasuorasta tasapainoehdosta. Lasketaan betonin reunapuristuma ja vetoterästankoihin syntyvä lisävenymä.

Alkuperäinen oman painon aiheuttama venymä vetoterästangossa ε_{g0} on likipitään

$$\varepsilon_{g0} = \frac{M_g}{M_{u0}} \cdot \varepsilon_{yk} \quad (2)$$

missä M_g on taivutusmomentti pysyvistä kuormista ja

M_{u0} on taivutuskapasiteetti ennen vahventamista.

ε_{yk} on vetoraudoituksen myötörajaa vastaava venymä.

Vetoraudoituksen tulee myötää, joten vetoraudoituksen venymän ε_s tulee olla

$$\varepsilon_{yk} \leq \varepsilon_s \leq 10 \text{‰}$$

Edellämainituilla ehdoilla vahvennetun rakenteen taivutuskapasiteetti lasketaan kaavan 1 mukaisesti käyttäen hiilikuituvahvikkeen arvoja:

$$M_u = N_l \cdot z_l + N_s \cdot z_s \quad (3)$$

missä z_l on vahvikkeen etäisyys puristusvyöhykkeen painopisteestä

z_s on vetoraudoituksen etäisyys puristusvyöhykkeen painopisteestä.

4.4.2.3 Raudoitteiden murtuminen

Mikäli raudoitteen venymä ylittää 10 ‰ ennen kuin lisävahvikkeet saavuttavat laskentalujuuden tai betoni murtuu puristetulta reunalta, on vahvikkeiden jännitystä pienennettävä esim. niiden poikkileikkausalaa lisäämällä

4.4.2.4 Betonin murtuminen

Betonin murtuminen tutkitaan siten, että lasketaan murtumista vastaava sisäinen vetovoimaresultantti N_t , joka on raudoitteiden ja vahvikkeen (teräslevy tai hiilikuitu) vetovoimien summa.

$$N_t = N_s + N_l \quad (4)$$

missä $N_s = A_s \cdot f_{yd}$ on raudoitteiden vetovoimakapasiteetti,

$N_l = A_l \cdot f_{ydl}$ on teräslevy- tai hiilikuituvahvikkeen vetovoima,

f_{ydl} on vahvikkeen vetolujuuden laskenta-arvo, teräksellä f_{yh} ja hiilikuidulla f_d .

Vaakasuorasta tasapainoehdosta johtuen puristusresultantin tulee olla yhtä suuri kuin vetovoimaresultantin.

Kun betonin murtolujuus tunnetaan, voidaan laskea tehollinen puristusvyöhykkeen korkeus y . Korkeuden y sekä vahvikkeiden venymien perusteella voidaan laskea betonin reunapuristuma, jonka tulee olla $\leq 3,5$ ‰, ja raudoitteen venymä. Raudoitteen venymän tulee olla vähintään myötövenymän suuruinen. Riittävän sitkeyden takaamiseksi hiilikuituvahventamisessa tulee raudoitteen myötövenymän olla kuitenkin vähintään 5 ‰.

Betonipoikkileikkauksen toimiva leveys määritetään B4:n /5/ mukaisesti.

4.4.2.5 Leikkauskapasiteetin tarkistaminen vahvennetulla alueella

Vahvennetulla alueella voidaan palkin leikkauskapasiteetti V_R laskea leikkausraudoittamattomana soveltamalla Betonirakenneohjeen /3/ kaavaa (2.2.6) siten, että lisätään raudoitussuhteen r arvoon liimattujen taivutusvahvikkeiden vaikutus.

$$V_R = 0,3 \cdot k \cdot (1 + 50 \cdot \rho_R) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (5)$$

missä
$$\rho_R = \frac{1}{b_w \cdot d} \left(A_s + A_l \cdot \frac{E_l}{E_s} \right) \quad (6)$$

$$k = 1,6 - d \text{ [m]} \geq 0,8, \text{ ks. /3/}$$

f_{ctd}	on betonin vetolujuuden laskenta-arvo,
b_w	on betonipalkin uuman leveys,
d	on poikkileikkauksen tehollinen korkeus,
A_s	on vetorausoituksen pinta-ala,
A_l	on vahvikkeiden pinta-ala,
E_s	on betoniteräksen kimmomoduuli, 200 000 N/mm ²
E_l	on vahvikkeen kimmomoduuli.

Leikkausraudoituksen osuus voidaan ottaa huomioon B4:n /5/ luvun 2.2.2.3 mukaisella menettelyllä.

Mikäli poikkileikkauksella ei ole riittävästi leikkauskapasiteettia, voidaan sitä lisätä liimattavilla leikkausvahvikkeilla, jotka mitoitetaan luvun 4.6 mukaan.

4.4.2.6 Leikkauskapasiteetin tarkistaminen vahvikelevyn päässä

Kun palkkirakenne vahvennetaan taivutukselle liimaamalla vahvikemateriaalia palkin alapintaan kenttään, voi vahvennetun palkkirakenteen leikkauskestävyys muodostua kriittiseksi tekijäksi sallittavien kuormien kasvaessa. Palkin leikkauskapasiteetin riittävyys tulee tarkistaa normaalimenetelmin /5/ vahvennetun rakenteen mitoituskuormalle. Kun vahvikemateriaali palkin alapinnassa on ulotettu lähelle tukea, sijaitsee kriittinen poikkileikkaus leikkaukselle usein juuri vahvikelevyn pään vieressä.

4.4.2.7 Leikkausjännityksen laskeminen liimapinnassa

Liimaliitos mitoitetaan siten, että siinä vaikuttava suurin leikkausjännitys ei ylitä leikkauslujuutta.

$$\begin{aligned} \tau_d &\leq f_{vd} \\ &\leq 1,0 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Leikkausjännityksen arvo lasketaan vastaavassa pystyleikkauksessa x vaikuttavasta leikkausvoimasta seuraavasti:

$$\tau_d = \frac{V_d(x) \cdot S_y}{I_y \cdot b} \quad (7)$$

missä $V_d(x)$ on leikkausvoiman suuruus palkin pisteessä x ,
 S_y staattinen momentti vahvikelevyn suhteen,
 I_y on palkkipoikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja
 b on vahvikelevyn leveys.

4.4.3 Käyttötilatarkastelut

4.4.3.1 Taipuma

Taipumatarkastelussa käytetään Tiehallinnon ohjeissa annettuja normaaleita taipumakriteereitä.

Taipumaa laskettaessa jäykkyys kasvaa liimausvahventamisen seurauksena vain hieman. Varsinkin liimatun hiilikuidun vaikutus jäykkyyteen on pieni, koska liimattavan vahvikkeen poikkipinta-ala on hiilikuidun suuresta lujudesta johtuen pieni. Rakennetta voidaan jäykistää jonkin verran enemmän käyttämällä hiilikuitutyyppejä, jolla on korkea kimmomoduuli.

Liimattava teräslevy vaikuttaa enemmän jäykkyyteen, koska sen pinta-ala on suurempi kuin hiilikuidulla ja kimmomoduuli samaa luokkaa.

4.4.3.2 Halkeilu

Vahventamismateriaalin vaikutus halkeiluun otetaan huomioon siten, että lisämateriaali lisää vetoraudoitusta kimmomoduulinsa ja pinta-alansa suhteessa.

Taivutushalkeilun osalta käytetään vahvennetulle rakenteelle normaaleja halkeamaleveyskriteereitä, jotka on esitetty B4:n /5/ kohdassa 2.3.3.

4.5 Laattojen vahventaminen taivutukselle

Vahvennettava laatta lasketaan kuten normaali laatta. Liimattava vahvike otetaan huomioon lisäraudoituksena kimmomoduulien suhteessa.

4.6 Palkkien vahventaminen leikkaukselle

Taivutettua palkkirakennetta voidaan vahventaa leikkaukselle liimaamalla palkin pystyseiniin vahvikemateriaalia. Teräslevy- tai hiilikuitunauhoja vahvikemateriaalina käytettäessä määritetään vahvennettavan rakenteen leikkauskapasiteetti seuraavasti. Laskentamenetelmä edellyttää vahvikelevyjien ankkuroimista sekä poikkileikkauksen veto- että puristuspuolelle.

Leikkausraudoitetun rakenteen leikkauskapasiteetti (halkeillut poikkileikkaus) muodostuu yhteenlaskettuna kolmesta osasta, betoniosan, vetoraudoituksen ja vahvikkeen leikkauskapasiteetista (vrt. B4 /5/, kohta 2.2.2.3).

$$V_u = V_c + V_s + V_l \quad (8)$$

Betoniosan ja leikkausraudoituksen kapasiteetit V_c ja V_s lasketaan B4:n /5/ mukaisesti.

Liimattavien levy- ja nauhavahvikkeiden oletetaan toimivan lisäleikkausraudoituksena alkuperäisen leikkausraudoituksen myötörajaa vastaavaan venymään saakka. Vahvikkeiden leikkauskapasiteetti V_l lasketaan siten samalla tavalla kuin leikkausraudoituksen kapasiteetti ottaen kuitenkin huomioon kimmomoduulien suhde vahvikkeen ja leikkausraudoituksen välillä kaavalla (9). Koska vahvikkeen laskentalujuutta ei saa ylittää, käytetään kaavan (10) mukaisen ehdon ylittyessä V_l :n laskennassa kaavaa (11).

$$V_l = 0,9 \cdot \frac{A_l}{s} \cdot \left(\frac{E_l}{E_s} \right) \cdot f_{yd} \cdot d \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (9)$$

kun $\frac{E_l}{E_s} \cdot f_{yd} \geq f_{ydl}$ (10)

$$V_l = 0,9 \cdot \frac{A_l}{s} \cdot f_{ydl} \cdot d \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (11)$$

joissa	A_l	on leikkausvahvikkeiden leikkeiden yhteenlaskettu poikkipinta-ala,
	s	on leikkausvahvikkeiden etäisyys pituussuunnassa,
	E_l	on vahvikemateriaalin kimmomoduuli,
	E_s	on betoniteräksen kimmomoduuli, 200 000 N/mm ² ,
	α	on leikkausvahvikkeiden ja vaakatason välinen kulma,
	f_{yd}	on leikkausraudoituksen vetolujuuden laskenta-arvo ja
	f_{ydl}	on vahvikkeen vetolujuuden laskenta-arvo.

Käytettäessä vahvikkeena palkin kylkiin liimattua hiilikuitukangasta, käytetään termin A_l/s tilalla termiä $2a_{er}$, jossa a_{er} on kankaan tehollinen poikkileikkausala metriä kohti.

4.7 Vahvikkeiden ankkurointikapasiteetti

Vahvikkeet ankkuroidaan yleisesti niiden täydelle kapasiteetille. Tällöin voidaan vaadittava ankkurointipituus l_v määrittää seuraavasti /15/

$$l_v = \frac{k_v \cdot f_{ydl} \cdot t}{f_{ct}} \geq 400 \text{ mm} \quad (12)$$

missä	k_v	= 1,5
	f_{ydl}	on vahvikelevyn vetolujuuden laskenta-arvo [N/mm ²]
	f_{ct}	on pintabetonin vetolujuus [N/mm ²]
	t	on vahvikelevyn paksuus [mm]

Ankkurointipituutta voidaan kuitenkin tarvittaessa pienentää lineaarisesti veto-voiman suhteessa kapasiteettiin.

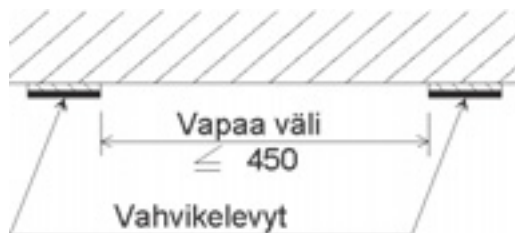
5 RAKENTEELLISET OHJEET

Teräslevyn leveyden suhde paksuuteen tulee olla vähintään $b/t \geq 50$. Pienemmän suhteen käyttäminen lisää jännityksiä liimakerroksessa ja betonin pinnassa.

Vahvikkeen maksimileveys on 300 mm, palkeissa poikkeustapauksissa 500 mm käytettäessä teräslevyille injektointiliimausta.

Laatoissa, palkkien seinissä ja pilareissa saa vahventamismateriaalilla peittää maksimissaan 1/3:n vahvennettavasta pinta-alasta. Näin taataan kosteuden riittävän tehokas poistuminen rakenteesta.

Laattarakenteissa vahvikelevyjen maksimivälimatkoja määriteltäessä sovelletaan B4:n /5/ vetorauoitukselle annettuja ohjeita. Niissä on maksimivälimatkaksi annettu 450 mm (enintään kolme kertaa laatan paksuus). Vahvikkeiden osalta ohjetta sovelletaan niiden vapaalle välille, ks. kuva 3. Pienempää välimatkaa kuin 250 mm ei tarvitse kuitenkaan käyttää. Leikkausvahventamisessa voidaan vahvikelevyjen maksimivälinä käyttää B4:n leikkausraudoituksen maksimietäisyyttä, 0,7d.



Kuva 3. Vahvikkeiden maksimietäisyys betonilaatassa.

Palkkirakenteissa palkin leveyden ollessa suurempi kuin sen rakennekorkeus, sovelletaan laatoille edellä annettuja ohjeita.

Hitsaamalla jatkettavien teräslevyjen minimipaksuus on 4 mm. Tarvittaessa hitsisauman väsymiskestävyys on tarkistettava. Jatkoksen kohdalla jatkettavien levyjen toleranssit saavat olla teräsrakenteiden yleisten laatuvaatimusten mukaisia.

6 VAHVENTAMISTYÖ

Vahventamistyön oikea suoritus on keskeinen tekijä vahventamistyön onnistumisen ja laadun kannalta. Tässä on esitelty keskeiset betonipalkkien ja –laattojen liimausvahventamisen suorituksen työvaiheet liittyen kolmeen liimausvahventamismenetelmään, puristusliimaukseen teräslevyillä ja hiilikuidulla sekä injektointiliimaukseen teräslevyillä.

Muille liimausvahventamismenetelmille tulee työvaiheet selvittää erikseen. Työvaiheet esitetään työtapaselityksessä.

Seuraavassa esitellyt työvaiheet alkavat tilanteesta, jossa betonirakenteen kunto on erikoistarkastuksella todettu riittäväksi, tarvittavat laaja-alaisemmat betonipintojen korjaukset tehty ja niiden onnistuminen tutkittu. Vanhoille ja korjatuille betonipinnoille on vetokokeilla määritetty tartuntalujuus, joka on todettu riittäväksi.

Esitettyjen työvaiheiden lisäksi tulee huolehtia vahventamistyön laadunvalvonnasta ja raportoinnista.

6.1 Puristusliimaus teräslevyillä

Teräslevyillä puristusliimauksena suoritettavan vahventamistyön tärkeimmät työvaiheet ovat:

- **Teräslevyn liimattavan pinnan puhdistus ja mahdollisten pintakäsittelyjen poisto suihkupuhdistuksella sekä suojaus primerilla.**
Ennen liimausta valmistettujen teräskappaleiden liimapinta puhdistetaan mieluiten tehdasolosuhteissa suihkupuhdistuksella (standardi ISO 8504, /8/) valssihilseestä, ruosteesta, pinnoitteista (esim. sinkitys) ja vieraasta aineksestä. Standardin SFS-EN 12944-4 /9/ mukainen standardi esikäsittelyaste on Sa2½. Suihkupuhdistuksen jälkeen poistetaan pöly, jonka jälkeen teräslevy on suositeltavaa käsitellä välittömästi primerilla sen ruostumisen estämiseksi ennen liimaustyötä. Primerin tulee olla yhteensopiva käytettävän liiman kanssa. Teräslevyt kuljetetaan sillalle suojattuna.
- **Teräslevyn jatkaminen**
Käytettäessä hitsausjatkoksia päittäishitseille vaaditaan hitsiluokkaa B (SFS-EN 5817 /16/). Hitsit hiotaan lisäksi molemmilta puolilta perusaineen tasoon ja tarkastetaan ultraäänellä 100 %:sti. Hitsausjatkokset ruiskusinkitään mikäli jatkaminen tehdään kuumasinkityksen jälkeen. Käytettäessä liimausjatkoksia sovelletaan liimauspinoille ja liimaliitokselle samoja vaatimuksia kuin teräslevyn liimaamisessa betoniin.
- **Liimausalustan tasoitus, karhennus ja puhdistus**
Pintojen nystemät ja kohoumat piikataan tai hiotaan pois ja mahdollisten paikkausten kunto tarkistetaan. Painaumien korjaukset voidaan tehdä epoksilaastilla. Betonipintojen korjaustöiden jälkeen karhennetaan betonialusta liimattavan vahvikkeen kohdalta liiman tartunnan lisäämiseksi ja poistetaan pinnasta irtonainen heikko aines, öljy ja rasva sekä sementtiliimakeros. Suositeltavia käsittelyvaihtoehtoja ovat betonirakenteille hiekkapuhallus, hionta ja vesihiekkapuhallus. Parhaaksi menetelmäksi on osoittautunut hiekkapuhallus, jossa menetelmänä voidaan käyttää SILKO 1.203:n /17/ mukaista suihkupuhdistusta tasoon normaali. Vesihiekkapuhallettu pinta painepestään. Pinnat kuivatetaan ja imuroidaan ennen liimausta. Mikäli sillan erikoistarkastuksen yhteydessä ei ole vielä suoritettu liimapinnan tartuntalujuustutkimuksia, suoritetaan puhdistetuille pinoille vähintään kolme tartuntavetokoetta.

- **Pintojen käsittely välittömästi ennen liiman levitystä**
Välittömästi ennen liimausta teräslevyn primeroitu liimapinta puhdistetaan ja tarvittaessa käsitellään liimavalmistajan ohjeen mukaan. Betonirakenteen liimapinnasta poistetaan pöly imuroimalla ja se käsitellään tarvittaessa primerilla liimavalmistajan ohjeiden mukaisesti.
- **Liiman sekoitus**
Liima sekoitetaan materiaalitoimittajan ohjeiden mukaisesti.
- **Liiman levitys betonipintaan ja vahvikkeeseen**
Liimaa levitetään sekä betonialustaan että teräslevyn koko sille alueelle, josta kuumasinkitys on poistettu. Joko betonipintaan tai teräslevyn levitettävän liimakerroksen profiili voidaan muotoilla erikoislastalla keskeltä paksummaksi siten, että pintoja yhteenpuristettaessa vältytään ilmasulkeumilta. Lisäksi voidaan käyttää levyyn porattuja reikiä ilman poistamiseen. Tasapaksu liimakerros voidaan varmentaa saumaan sijoitettavin välikkein. Yleisesti käytetty liimasauman kokonaispaksuus on 2 - 3 mm.
- **Liimattavan pinnan kosteusolosuhteet**
Liimausolosuhteiden osalta betonirakenteen lämpötilan tulee olla 3°C korkeampi kuin ilman kastepiste.
- **Vahvikkeen kiinnitys ja tukeminen**
Teräslevy on suositeltavaa tukea erityisellä tukipalkistolla, jonka avulla teräslevyn saaminen oikealle korkeudelle ja sen kiinnipysyminen betonipinnassa liiman kovettumisen ajan voidaan varmentaa. Levy voidaan tukea betoniin myös suoraan levyyn tasavälisesti sijoitetuilla kiinnityspulteilla. Levy on kiinnitettävä liiman valmistajan ilmoittaman avoimen ajan puitteissa. On huomattava, että korkeampi lämpötila lyhentää avointa aikaa.
- **Ankkurointiruuvien kiinnitys**
Vahvikelevyjen päihin sijoitetaan ankkurointiruuvit, jotka ottavat vastaan irrottavan voiman levyn päässä.
- **Liiman kovettuminen**
Vaadittavat lämpötila- ja kosteusolosuhteet sekä niistä riippuva liiman kovettumisaika tarkistetaan materiaalitoimittajan antamista ohjeista ja niitä seurataan mittauksin. Liikenne voi aiheuttaa rakenteen muodonmuutoksia ja tärinää, joka vaikuttaa liimaustyön onnistumiseen ja voi alentaa liimaliitoksen lujuutta. Vaikutusta voidaan pienentää nopeusrajoituksella ja tarpeen vaatiessa raskasta liikennettä rajoittamalla. Rautatiesilloilla voidaan liiman kovettuminen ajoittaa liikennekatkojen ajaksi.
- **Liimasauman tarkastus ja mahdolliset korjaukset**
Liiman kovettutua teräslevyn alle jääneet ilmasulkeumat voidaan havaita äänen perusteella teräslevyä koputtelemalla tai tarvittaessa esim. ultraäänitarkastuksella. Selvästi havaittavat ontelot on suositeltavaa injektoida umpeen. Injektointi tehdään liimasauman reunaosien suhteen sivusta päin ja keskiosien suhteen teräslevyn läpi. Jos tyhjätiloja on paljon, poistetaan levy ja liimataan uusi levy.
- **Vahventamistyön raportointi**
Vahventamistyöstä laaditaan laaturaportti kohdan 6.4 mukaisesti.

6.2 Puristusliimaus hiilikuidulla

Hiilikuitunauhoilla puristusliimauksena suoritettavan vahventamistyön tärkeimmät työvaiheet ovat:

- **Liimausalustan tasoitus, karhennus ja puhdistus**
Ks. kohta 6.1.
- **Pintojen käsittely välittömästi ennen liiman levitystä**
Vahvikenauha puhdistetaan materiaalitoimittajan antamien ohjeiden mukaisesti. Puhdistetut nauhat säilytetään liiman levitykseen saakka siten, että ne eivät pääse likaantumaa. Betonirakenteen liimapinnasta poistetaan pöly imuroimalla ja se käsitellään tarvittaessa primerilla liimavalmistajan ohjeiden mukaisesti.
- **Liiman sekoitus**
Liima sekoitetaan materiaalitoimittajan ohjeiden mukaisesti.
- **Liiman levitys betonipintaan ja vahvikkeeseen**
Liimaa levitetään sekä betonialustaan että hiilikuitunauhaan. Ilmasulkeumien välttämiseksi muotoillaan hiilikuitunauhaan levitettävän liimakerroksen profiili keskeltä paksummaksi esim. erityistä liimakaukaloa käyttäen. Liimakerroksen kokonaispaksuus on kaksikomponenttisellä epoksiliimalla n. 2 mm.
- **Liimattavan pinnan kosteusolosuhteet**
Liimausolosuhteiden osalta betonirakenteen lämpötilan tulee olla 3°C korkeampi kuin ilman kastepiste.
- **Vahvikkeen kiinnitys**
Hiilikuitunauha painetaan kiinni alustaan. Kiinnitystyö aloitetaan nauhan päästä tai keskeltä. Samalla kun nauhaa painetaan kiinni alustaan, sitä telataan rullalla tai lastalla siten, ettei liimasaumaan muodostu ilmasulkeumia. Lopuksi nauhaa telataan niin, että ylimääräinen liima poistuu ja liimasaumasta tulee tasapaksu. Tarvittaessa nauhat tuetaan liiman kovettumisen ajaksi. Levy on kiinnitettävä liiman valmistajan ilmoittaman avoimen ajan puitteissa. On huomattava, että korkeampi lämpötila lyhentää avointa aikaa.
- **Puhdistus**
Ylimääräinen liima ja nauhojen pinnat puhdistetaan ottaen huomioon mahdolliset pintakäsittelyt.
- **Liiman kovettuminen**
Ks. kohta 6.1
- **Liimasauman tarkastus ja mahdolliset korjaukset**
Nauhojen kiinnittyminen ja mahdolliset tyhjätilat voidaan löytää äänen perusteella koputteleamalla vahviketta tai vetämällä onttoa muovikappaletta sen pintaa pitkin. Mahdolliset tyhjätilat injektoidaan täyteen epoksilla liimasauman kautta. Jos tyhjätiloja on paljon, poistetaan nauha ja liimataan uusi nauha.

- **Hiilikuituvahvikkeen pinnoitus**
Vahvike voidaan pinnoittaa mm. sen vaurioitumista vastaan tai ulkonäöllisistä syistä tarkoitukseen soveltuvilla aineilla.
- **Vahventamistyön raportointi**
Vahventamistyöstä laaditaan laaturaportti kohdan 6.4 mukaisesti.

6.3 Injektointiliimaus teräslevyillä

Teräslevyillä injektointiliimauksena suoritettavan vahventamistyön tärkeimmät työvaiheet ovat:

- **Teräslevyjen käsittely ennen liimausta**
Ennen liimausta valmistettujen kappaleiden liimapinta puhdistetaan suihkupuhdistuksella valssihilseestä, ruosteesta ja muista epäpuhtauksista. Käsittelyaste on Sa2½. Jos liimattavat kappaleet on kuumasinkitty, pehmyt sinkki ja osa sinkkirautakerroksesta poistetaan liimapinnasta tehdastyönä suihkupuhdistusmenetelmin.
- **Teräslevyn jatkaminen**
Käytettäessä hitsausjatkoksia päittäishitseille vaaditaan hitsiluokkaa B (SFS-EN ISO 5817 /16/). Hitsit hiotaan lisäksi molemmilta puolilta perusaineen tasoon ja tarkastetaan ultraäänellä 100 %:sti. Kuumasinkittyjen teräslevyjen hitsausjatkokset ruiskusinkittää SILKO-ohjeen 2.354 /18/ mukaan. Hitsausjatkokset ruiskusinkittää. Käytettäessä liimausjatkoksia sovelletaan liimauspinnoille ja liimaliitokselle samoja vaatimuksia kuin teräslevyn liimaamisessa betoniin.
- **Liimausalustan käsittely ennen liimausta**
Pintojen nystermät ja kohoumat piikataan tai hiotaan pois ja mahdollisten paikkausten kunto tarkistetaan. Liimattavasta betonipinnasta poistetaan sementtiliima ja epäpuhtaudet normaaliin suihkupuhdistusasteeseen SILKO 1.203:n /17/ mukaisesti. Märkähiekkapuhallettu pinta painepestään ja kuivatetaan. Kuivahiekkapuhallettu pinta imuroidaan ennen liimausta.
- **Liimattavan pinnan kosteusolosuhteet**
Liimausolosuhteiden osalta betonirakenteen lämpötilan tulee olla 3°C korkeampi kuin ilman kastepiste.
- **Teräsvahvikkeen asennus ja reunojen tiivistys**
Vahvike asennetaan betonirakenteen liimapintaa vasten esim. teräsvälikkeitä käyttäen siten, että saadaan muodostumaan halutun paksuinen liimarako. Liimaraon normaali paksuus on 1...2 mm. Vahvike tuetaan ja vahvikkeen reunat tiivistetään ympäriinsä siten, että rakoon voi muodostua pientä painetta injektoitaessa. Suositeltava reunan tiivistysaine on epoksi- tai polymeerikitti.

- **Liimaus**
Liima injektoidaan muodostuneeseen liimarakoon tarkoitukseen soveltuvalla kalustolla.
- **Ankkurointi**
Tarvittaessa suoritetaan päiden ankkurointi ruuveilla.
- **Liiman kovettuminen**
Ks. kohta 6.1
- **Liimasauman tarkistus**
Liiman kovettuttua teräslevyn alle jääneet ilmasulkeumat voidaan havaita äänen perusteella teräslevyä koputtelemalla tai tarvittaessa esim. ultraäänitarkastuksella. Selvästi havaittavat ontelot on injektoitava umpeen. Injektointi tehdään liimasauman reunaosien suhteen sivusta päin ja keskiosien suhteen teräslevyn läpi. Jos tyhjätiloja on paljon, poistetaan levy ja liimataan uusi levy.
- **Teräsvahvikkeen pinnoitus**
Vahvike voidaan maalata sopivalla maaliyhdistelmällä (SILKO-ohjeet 2.354 /18/ ja 3.352 /19/).
- **Vahventamistyön raportointi**
Vahventamistyöstä laaditaan laaturaportti kohdan 6.4 mukaisesti.

6.4 Vahventamistyön raportointi

Liimausvahventamistyöstä laaditaan laadun varmistamiseksi laaturaportti, josta selviävät seuraavat asiat:

- käytetyt työtavat eri vaiheineen,
- käytetyt materiaalit ja ainemenekit,
- suoritettujen liimaustyöhön liittyneet testit ja niiden tulokset,
- olosuhteet liimaustyön aikana kaksi kertaa vuorokaudessa:
 - ilman lämpötila,
 - vahvennettavan rakenteen pintalämpötila,
 - suhteellinen kosteus, sekä
- liiman kovettumisen aikaiset olosuhteet tarvittaessa.

7 TUTKIMUKSET

7.1 Sillalle suoritettavat tutkimukset

Ensimmäisenä vaiheena sillan vahventamisprojektissa on yleensä sillan erikoistarkastus. Erikoistarkastuksen tuloksia käytetään yleisesti sillan korjaus- ja vahventamismahdollisuuksien selvittämiseen, käyttöiän arviointiin sekä korjaustyön ohjelmointiin. Erikoistarkastukseen liittyvät vaatimukset annetaan yleisesti Sillantarkastusohjeessa /13/. Betonirakenteen kuntovaatimukset on esitetty luvussa 2.

Liimausvahventamiseen liittyen sillalle suoritettavien tutkimusten tarkoituksena on saada tiedot betonirakenteen kunnosta erityisesti vahvennettavan betonipinnan osalta. Tärkeätä on saada varmuus liimattavien vahvikelevyjen kiinnipysymisestä, johon vaikuttavat betonirakenteen osalta mm. raudoitteiden mahdollinen korroosio sekä betonipeitteen lujuus, laatu ja kunto. Tutkimuksilla määritetään vahvennettavan betonirakenteen osalta ainakin seuraavat asiat:

- silmämääräinen kunto, mm. halkeilu ja lohkeamat,
- karbonatisoitumissyvyys,
- kloridipitoisuus (eri syvyyksillä),
- raudoitusta suojaavan betonipeitteen paksuus,
- raudoituksen korroosiotila ja
- betonipinnan tartuntalujuus.

Betonin puristuslujuuden määrittäminen poratuista näytteistä sekä sen sisäisen rakenteen ja mahdollisten vaurioiden selvittäminen ohuthiekokeilla on suositeltavaa. Vanhojen siltojen osalta ei lujuuden arviointi kimmovasaralla toimi luotettavasti, koska betonin ikääntyessä karbonatisoitumisen seurauksena sen pintaosan lujuus kasvaa.

Betonirakenteen silmämääräisessä tarkastelussa kiinnitetään erityistä huomiota vahvennettavan betonipinnan kuntoon. Näkyvien halkeamien sijainti, halkeamaleveydet, lohkeamat ym. betonipinnan epätasaisuudet sekä paljastuneiden betoniterästankojen sijainti kirjataan. Vesivuotokohdat (esim. laatan läpi menevien halkeamien kautta) kirjataan. Irtoilevat betonipinnat selvitetään vasaralla koputteleamalla. Raudoitteiden betonipeitteen paksuus selvitetään betonipeitemittarilla. Paikallisesti voidaan raudoitteiden sijainti ja mahdollinen korroosio selvittää myös piikkaamalla raudoite esille.

Silmämääräisen tarkastuksen yhteydessä määritetään näytteenottokohdat. Po-raamalla irrotetuista näytteistä voidaan määritellä karbonatisoitumissyvyys, kloridipitoisuus, betonin puristuslujuus sekä mikrorakenne ohuthieistä tehtävillä mikroskooppitutkimuksilla. Porattavan näytteen läpimitta riippuu mm. betonin kiviaineksen suurimmasta raekoosta. Tarkempia ohjeita näytteiden koosta ja irrotuksesta annetaan mm. standardissa SFS-EN 12504-1 /11/ sekä Sillantarkastusohjeessa /13/.

Karbonatisoitumissyvyys selvitetään esimerkiksi ruiskuttamalla näytteen pinnalle fenolftaleiiniliuosta. Kloridipitoisuus selvitetään eri syvyyksiltä otetuista jauhenäytteistä (SFS 5451 /12/).

Kun karbonatisoitumissyvyys, kloridien tunkeutumissyvyydet sekä raudoitteiden peitepaksuus on erikoistarkastuksella selvitetty, voidaan arvioida, milloin karbonatisoituminen ja kloridit etenevät raudoitteiden syvyydelle. Mikäli karbonatisoituminen tai kloridit ovat jo edenneet raudoitteiden tasolle, on syytä selvittää tarkemmin raudoitteiden kunto sekä määrittää tarvittavat korjaustoimenpiteet.

Raudoitteiden korroosion olemassaoloa, etenemistä ja korroosioalueita voidaan selvittää potentiaali- ja korroosionopeusmittauksin. Näitä menetelmiä tulisi käyttää varsinkin, jos korroosion voidaan arvioida muiden tutkimusten perusteella jo alkaneen. Paikallisesti raudoitteiden korroosiota voidaan tarkistaa visuaalisesti betonipeite poistamalla. Pidemmälle edetessään näkyy korroosio betonipeitteen halkeiluna ja lohkeamina.

Betonipinnan tartuntalujuus voidaan vahvennettavalla alueella selvittää tartuntavetokokeilla. Kokeiden suositeltava minimimäärä on 6 kpl. Tällöin tulee kaikkien koetulosten ylittää tartuntavetolujuuden minimiarvo vaatimus. Kokeiden määrää lisätään vahvennettavan kohteen ollessa laaja. Ennen koetta on betonipinta esikäsiteltävä esim. teräsharjauksella tai hiekkapuhalluksella sekä poistettava hiontapöly.

Lisäksi on ennen vahventamistyötä tehtäviin tarkastuksiin sisällytettävä sillan vedeneristyksen kunnon tarkastus. Vuotava vedeneristys on uusittava vahventamistyön yhteydessä.

7.2 Liimaustyöhön liittyvä testaus ja mittaukset

Liiman testaus työmaalla suoritetaan siten, että liimataan yhteensä vähintään kolme teräsnaippia $\varnothing \approx 50$ mm teräspalkkiin. Vetokokeet suoritetaan viikon kuluessa liimauksesta, johon saakka teräsnaappeja tulee säilyttää betonisille koekappaleille annettujen ohjeiden (standardi SFS-EN 12390-3 /14/) mukaisesti.

Mikäli liimausvahventamista tehdään sillan kannen yläpinnalle epoksiliimoja käyttäen, tulee lämpötilamittauksin varmentua, ettei lämpötila epoksiliimassa nouse liian suureksi. Lämpötilan liiallinen nousu aiheuttaa epoksiliiman pehmenemisen ja alentaa liiman lujuutta. Sallitut maksimilämpötilat saadaan materiaalivalmistajan antamista tiedoista. Myös hiilikuitutuotteille voi olla vastaavia maksimilämpötiloja.

Liimaustyön vaatimat lämpötila -ja kosteusolosuhteet varmistetaan asianmukaisin mittauksin (ks. kohta 6.4)

7.3 Testaukset vahventamisen jälkeen

Mikäli halutaan varmistua vahventamissysteemin toimivuudesta, voidaan vahvennetulle rakenteelle suorittaa koekuormitus sekä niihin liittyviä mittauksia. Näissä voidaan mitata mm. vahventamismateriaalille tulevia venymiä, joita voidaan verrata laskentatuloksiin. Koekuormitus voidaan normaaliolosuhteissa suorittaa noin viikon päästä liimaustyön päättymisestä ottaen huomioon valmistajan liimalle antamat kovettumisnopeusarviot.

8 VAHVENTAMISSUUNNITELMAN ESITTÄMINEN

Vahventamissuunnitelman esittämisessä noudatetaan soveltuvin osin sillan rakennussuunnitelmasta annettuja ohjeita ja määräyksiä. Esitettävät dokumentit ovat yleisesti seuraavat:

- sillan yleispiirustus,
- sillan mittapiirustus,
- tarkastusselostus
- vahvikkeiden kiinnityspiirustukset,
- muut rakennepiirustukset,
- siltakohtainen työselitys laatuvaatimuksineen sekä
- vahventamislaskelmat.

SYMBOLILUETTELO

AA	Ajoneuvoasetuksen 1990 60 t:n kuormakaavio	[-]
A_l	Vahvikkeiden pinta-ala	[m ²]
A_s	Vetoraudoituksen pinta-ala	[m ²]
a_{ef}	Vahvikekankaan tehollinen pinta-ala	[m ² /m]
E	Kimmomoduuli	[N/mm ²]
E_l	Vahvikemateriaalin kimmomoduuli	[N/mm ²]
E_s	Betoniteräksen kimmomoduuli	[N/mm ²]
EK	Yliraskaiden erikoiskuljetusten kuormakaaviot	[-]
b	Poikkileikkauksen leveys	[m]
b_w	Betonipoikkileikkauksen toimiva leveys	[m]
d	Betonipoikkileikkauksen tehollinen korkeus	[m]
f	Lujuus	[N/mm ²]
f_{ct}	Pintabetonin lujuus	[N/mm ²]
f_{ctd}	Betonin vetolujuuden laskenta-arvo	[N/mm ²]
f_d	Veto- ja puristuslujuuden laskenta-arvo	[N/mm ²]
f_k	Veto- ja puristuslujuuden ominais-arvo	[N/mm ²]
f_u	Murtolujuus	[N/mm ²]
f_{yk}	Teräksen veto- ja puristuslujuuden ominaisarvo	[N/mm ²]
f_{yd}	Teräksen veto- ja puristuslujuuden laskenta-arvo	[N/mm ²]
f_{ydl}	Vahvikkeen vetolujuuden laskenta-arvo	[N/mm ²]
k_v	Kerroin	[-]
I	Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti	[m ⁴]
I_v	Taivutusvahvikkeen ankkurointipituus	[m]
M_g	taivutusmomentti pysyvistä kuormista	[MNm]
M_u	Taivutuskapasiteetti murtotilassa	[MNm]

M_{u0}	Taivutuskapasiteetti ennen vahventamista	[MNm]
N_l	Liimausvahvikkeessa vaikuttava vetovoima	[MN]
N_s	Betoniraudoituksen vaikuttava vetovoima	[MN]
N_t	Betoniraudoituksen vetovoimakapasiteetti	[MN]
Q	Leikkausvoima	[MN]
S	Poikkileikkauksen staattinen momentti	[m ³]
t	Vahvikkeen paksuus	[mm]
V	Leikkauskapasiteetti	[MN]
V_c	Betonipoikkileikkauksen leikkauskapasiteetti	[MN]
V_l	Leikkausvahvikkeiden kapasiteetti	[MN]
V_R	Vahvennetun palkin leikkauskapasiteetti	[MN]
V_s	Leikkausraudoituksen kapasiteetti	[MN]
w	Halkeamaleveys	[mm]
x	Betonipoikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeus	[m]
x	Etäisyys palkin tuelta	[m]
z_l	Vahvikelevyn etäisyys puristusvyöhykkeen painopisteestä	[m]
z_s	Vetopuolen betoniraudoituksen etäisyys puristusvyöhykkeen painopisteestä	[m]
α	Leikkausraudoituksen/leikkausvahvikkeiden ja vaakatason välinen kulma	[°]
ε	Suhteellinen venymä	[-]
ε_{g0}	Venymä omasta painosta	[-]
ε_s	Teräsvenymä	[-]
ε_u	Murtovenymä	[-]
ε_{yk}	Suhteellinen karakteristinen venymä	[-]
γ_{ch}	Hiilikuidun osavarmuuskerroin	[-]
γ_m	Materiaalin osavarmuuskerroin	[-]

μ	Suppeuskerroin	[-]
ζ	Materiaalin tiheys	[kg/m ³]
ζ_R	Vahvennetun poikkileikkauksen raudoitussuhde	[-]
σ	Jännitys	[N/mm ²]
τ	Leikkausjännitys	[N/mm ²]
τ_{max}	Suurin leikkausjännitys	[N/mm ²]
τ_{sall}	Suurin sallittu leikkausjännitys	[N/mm ²]

LÄHDELUETTELO

- 1 Siltojen kuormat. Helsinki: Tielaitos, 1999. TIEL 2172072-99. ISBN 951-726-583-2
- 2 Siltojen kantavuuden laskentaohje. Helsinki: Tielaitos, 1992. TIEL 2170005. ISBN 951-47-6859-0
- 3 Betonirakenneohjeet. Helsinki: Tiehallinto, 2006. Verkkojulkaisu pdf (www.tiehallinto.fi/sillat) TIEH 2100037-v-06. ISBN 951-803-580-6.
- 4 Teräsrakenneohjeet. Helsinki: Tielaitos, 2000. TIEL 2173449-2000. ISBN 951-726-610-3
- 5 Suomen rakentamismääräyskokoelma, B4 Betonirakenteet, ohjeet 2005. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 6 Suomen rakentamismääräyskokoelma, B7 Teräsrakenteet, ohjeet (1996) ja liite 2 (2001). Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 7 Sillanrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset. Teräsrakenteet - SYL 4. Helsinki: Tiehallinto, 2005. TIEH 2200035-05. ISBN 951-803-435-4.
- 8 SFS-EN ISO 8504. Teräspintojen esikäsitteily ennen maalien ja vastaavien tuotteiden levitystä (Preparation of steel substrates before application of paints and related products). Osat 1 - 3.. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS, 2001.
- 9 SFS-EN ISO 12944-4. Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 4: Pintatyypit ja pinnan esikäsitteily. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS, 1998.
- 10 PrEN 1504 – 4 (December 1999). Products and systems for protection and repair of concrete structures. Definitions – requirements – quality control and assestation of conformity. Structural Bonding.
- 11 SFS-EN 12504-1. Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappalet. Näytteenotto, tutkiminen ja puristuslujuuden testaus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS, 2000.

- 12 SFS 5451: 1988. Betoni. Kloridipitoisuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 1988.
- 13 Sillantarkastusohje. Helsinki: Tiehallinto, 2004. TIEH 2000008-04. ISBN 951-803-105-9
- 14 SFS-EN 12390-3. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2000.
- 15 BRO 2004. Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar. Publikation 2004: 56.
- 16 SFS-EN ISO 5817. Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections (ISO 5817:2003). Hel-sin-ki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2003.
- 17 SILKO 1.203. Siltojen korjaus. Yleiset laatuvaatimukset. Betonirakenteet. Purkamis- ja esikäsittelymenetelmät. Helsinki: Tiehallinto, Siltatekniikka, 2002. TIEH 2230095.
- 18 SILKO 2.354. Siltojen korjaus. Työkohtaiset laatuvaatimukset. Teräs rakenteet. Vanhan ja uuden sinkkipinnoitteen maalaus. Helsinki: Tiehallinto, Siltatekniikka, 2005. TIEH 2230096.
- 19 SILKO 3.352. Siltojen korjaus. Tarviketiedosto. Teräsrakenteet. Maalaus järjestelmät. Helsinki: Tielaitos, Siltayksikkö, 1998. TIEL 2230097.
- 20 SILKO 2.231. Siltojen korjaus. Työkohtaiset laatuvaatimukset. Betonirakenteet. Paikkaus ilman muotteja. Helsinki: Tiehallinto, Siltatekniikka, 2005. TIEH 2230096.
- 21 SILKO 2.236. Siltojen korjaus. Työkohtaiset laatuvaatimukset. Betonirakenteet. Halkeaman injektointi voimia siirtäväksi. Helsinki: Tiehallinto, Siltatekniikka, 2003. TIEH 2230096.

