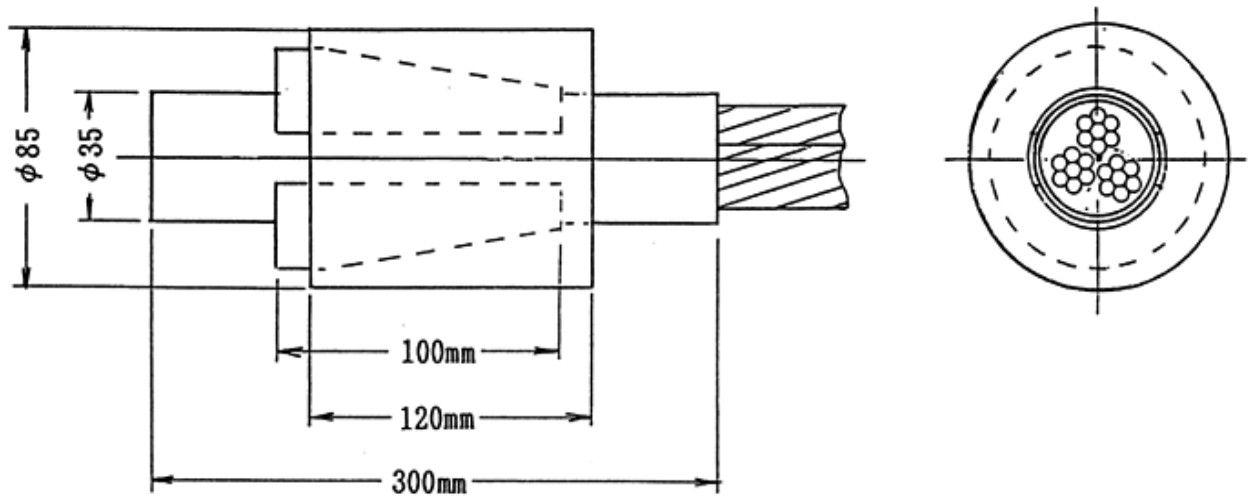


TUTKIMUSSELOSTUS A-5552

SILTOJEN RAUDOITTEIDEN KORVAAMINEN EI-METALLISILLA TANGOILLA JA PUNOKSILLA



CONTESTA

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

SISÄLLYSLUETTELO**sivu****Tiivistelmä****Abstract**

1	JOHDANTO	1
2	EI-METALLISET TUOTTEET	2
2.1	Ei-metallisten tuotteiden materiaalit	2
2.2	Ei-metallisten tuotteiden käyttö betonirakenteissa	3
2.2.1	Käyttö tavanomaisten raudoitteiden asemasta	3
2.2.2	Käyttö jänneraudoitteiden asemasta	5
2.2.3	Käyttö betonirakenteen vahventamisessa	6
2.3	Ei-metallisten tankojen ja punosten ominaisuudet ja vertailu tavanomaiseen raudoitukseen	7
2.4	Ei-metallisten tankojen ja punosten käytön taloudellisuus	11
3	RAUDOITTEIDEN ASEMASTA KÄYTETTÄVIEN EI-METALLISTEN TUOTTEIDEN KÄYTTÖKOHTEET	12
3.1	Infrakohteiden esimerkkejä	12
3.2	Talonrakentamisen esimerkit	13
4	EI-METALLISTEN TANKOJEN JA PUNOSTEN KÄYTTÖ SILLOISSA	14
5	SUUNNITTELUOHJEET	21
6	ESIMERKKISILTA	24
6.1	Ei-metallisten tankojen ja punoksien käyttömahdollisuudet esimerkkisillassa	24
6.2	Esimerkkisillan elinkaarikustannukset	25

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

sivu**7 JATKOTUTKIMUSSUUNNITELMA 27****8 YHTEENVETO 28****LÄHDELUETTELO 29****LIITTEET****Liite 1: Esimerkkisillan kannen raudoituspiirustus**

Tiivistelmä

Tässä esitutkimuksessa tarkasteltiin ei-metallisia tankoja ja punoksia ja mahdollisuuksia korvata niillä siltojen perinteelliset raudoitukset. Ulkomailla, kuten Kanadassa, USA:ssa ja Japanissa, nämä tuotteet ovat silloissa ja eräissä muissakin rakenteissa jo käytössä. Euroopassa on rakennettu muutamia koesiltoja ja muitakin koerakenteita. Suomessa näiden tuotteiden käytön tutkimus on ollut vielä vähäistä. Siltojen vahvistamiseen on Suomessa jo käytetty ei-metallisia hiilikuitunauhoja ja epoksiliimausta.

Ei-metallisten tankojen ja punosten käyttö silloissa perustuu niiden erikoisominaisuuksiin kuten hyvään korroosionkestävyyteen, vetolujuuteen (hiilikuiduilla suunnitellu vetolujuus 1,6 GPa) ja keveyteen. Toisaalta ei-metallisten tankojen ja punosten huono palonkestävyys, korkea hinta ja valmistustekniikan erikoisuudet sekä vielä osittain epäselvä suolapakkaskestävyys rajoittavat niiden käyttöä.

Korkeita materiaalikustannuksia korvaavat mm. hyvän korroosionkeston ansiosta alhaiset ylläpito- ja korjauskustannukset, rakenteen pienemmät dimensiot ja keventynyt paino. Näin ei-metallisten tuotteiden käyttö perinteellisen raudoitteen korvaajana voi olla taloudellisesti edullista. Elinkaarikustannuslaskelmilla todettiin, että keskikokoisessa maantiesillassa ei-metallisten tankojen (lasikuitu- ja hiilikuitutangot) käyttö on edullista sillan reunapalkeissa. lasikuitutangot ovat edullisia myös koko sillassa. Jännepunoksia ei vielä kannata korvata ei-metallisilla tuotteilla.

Jatkotutkimuksissa on tarpeen ensin selvittää ei-metallisten tankojen suolapakkaskestävyys suomalaisissa olosuhteissa. Sillan, jossa käytetään ei-metallisia tankoja, suunnittelua ja toteutusta varten on laadittava ohjeet. Ei-metallisten tankojen valmistusta Suomessa tulee edistää ja ennen laajamittaista ei-metallisten tankojen käyttöönottoa Suomessa on syytä rakentaa koesilta käyttäen ko. tuotteita.

Abstract

In this preliminary study non-metallic bars and tendons as well as the possibilities to compensate with these the traditional reinforcements of bridges are studied.

Abroad, like in Canada, USA and Japan, these products are already widely used in bridges and also in some other constructions. Also in Europe some test bridges and other test constructions has been build. In Finland research of the use of these products has still been minor. The use of non-metallic carbon fiber belts and epoxy glueing for strengthening of bridges is of common knowledge also in Finland.

The use of non-metallic bars and tendons is based on their special properties like good corrosion resistance, tensile strength (design tensile strength of carbon fibers is 1,6 GPa) and lightness. Fire resistance, high material cost, specialities of manufacturing technique and still partially indistinct salt-frost resistance properties limit their wider utilization.

On the other hand, low maintenance and fixing costs due to good corrosion resistance properties, smaller dimensions and lighter weight of constructions compensate the higher material costs. Thus the use of non-metallic products as compensation of traditional reinforcement can be economical. Based on lifetime cost calculations, it has been found, that in a middle size road bridge it is economical to use non-metallic bars (glass fibre and carbon fibre bars) in edge beams of a bridge. Moreover, glass fiber bars are economical also in a whole bridge. However, compensation of tendons with non-metallic products is not yet economical.

In the next step, the salt-frost resistance of non-metallic bars in Finnische conditions should be studied. In order to design and build a bridge with non-metallic bars suitable design guides are needed. Manufacturing of non-metallic bars should be promoted in Finland. Before a wider use of non-metallic bars in Finland, it is worth building a test bridge using these non-metallic products.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

Jakelu:
Tiehallinto
Siltateknikka
PL 33
00521 Helsinki

Tarkastaja, pvm

Hyväksyjä, pvm

Korvaa

Avainsanat

SILTOJEN RAUDOITTEIDEN KORVAAMINEN EI-METALLISILLA TANGOILLA JA PUNOKSILLA. ESITUTKIMUS

9 JOHDANTO

Teräs- ja jännebetoni ovat silloissa yleisesti käytettyjä materiaaleja. Betonilla on hyvä puristuslujuus, mutta hyvin pieni vetolujuus. Betonin pienen vetolujuuden vuoksi käytetään raudoitteita betonirakenteen vetopuolella. Terästangot ovat betonirakenteen vetotankoina yleisessä käytössä ja ne ovat tehokkaita ja kustannuksiltaan edullisia raudoitteita, jos rakenteeseen ei tule kloridirasitusta. Kloridirasitusta voi siltoihin aiheutua teiden suolauksesta ja merivedestä. Ilman erikoistoimenpiteitä tämä johtaa terästen korroosioon ja rakenteen vaurioitumiseen. Epoksinnoitettujen terästen ongelmana ovat melko korkea hinta ja pinnoitteen rikkoutumisvaara. Ruostumaton teräs ei ruostu kloridien vaikutuksesta läheskään samassa määrin ja yhtä nopeasti kuin tavallinen teräs, mutta se on usein liian kallista. Ei-metalliset tangot ja punokset eivät ruostu. Tavoitteena on sillan peruskorjausvälin pidentäminen.

Raudoituksen korroosio aiheuttaa betonisilloissa Suomessa mittavia korjauskustannuksia vuosittain. Käyttämällä ei-metallisia komposiittimateriaaleja betonisiltojen raudoitteiden asemasta, joko korvaamaan koko raudoitus tai vain kloridikorroosion kannalta kriittisimmässä osissa betonisiltaa kuten reunapalkeissa ja siltalaatan ylä- ja alapuolisissa reuna-alueissa, on tulevaisuudessa mahdollisuuksia saavuttaa merkittäviä säästöjä siltojen kunnossapidossa ja korjauksissa. Ei-metalliset tangot ja punokset ovat usein kalliimpia kuin tavallinen raudoiteteräs, mutta niiden tuomat hyödyt kuten hyvä korroosionkestävyys (kestävät klorideja, eivät ruostu karbonatisoituneessakaan betonissa), pienet betonipeitekerrokset (johtuen hyvästä korroosionkestävyydestä), suuri vetolujuus (1,5 –2 kertaa suurempi kuin teräksellä) ja pieni paino (vain 25 % teräksen painosta) tuovat säästöjä kun otetaan huomioon sillan koko elinkaari. Ei-metallisia tankoja ja punoksia on jo käytetty useissa koesilloissa ja silloissa yleisemminkin ulkoilla ja niistä on kertynyt jo merkittävästi kokemustietoakin.

Ei-metallisia tankoja ja punoksia on käytetty silloissa tavanomaisten raudoitteiden korvaajina ja siltapalkin alapintaan liimattuja hiilikuitulevyjä tai nauhoja on käytetty vanhojen siltapalkkien vahvistamiseen. Myös laattoja ja pilareita on vahvistettu ei-metallisilla tuotteilla. Tässä yhteydessä tarkastellaan erityisesti ensiksi mainittua ei-metallisten tankojen ja punosten käyttöä, sillä jälkimmäinen, betonirakenteiden vahvistaminen on jo tullut käyttöön Suomessakin.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

Suomessa on kehitetty siltojen reunapalkkeja varten kuorirakenne, jossa käytetään raudoitteena ruostumatonta teräslaattaa / 39, 40 /. Tässä rakenteessa voitaisiin ruostumattoman teräksen tilalla ajatella käytettäväksi ei-metallisia tankoja. Reunapalkkikuorielementit kiinnitetään kantavaan rakenteeseen mekaanisin liittimin tai valamalla ja ne ovat myöhemmin irrotettavissa ja vaihdettavissa.

Tämä esitutkimus luo edellytykset laatia jatkosuunnitelma koesillalle, jossa käytetään raudoitteiden asemasta ei-metallisia tankoja ja punoksia, toteuttaa se ja seurata koesillan rakenteiden käyttäytymistä esimerkiksi optisten kuitujen avulla. Samalla edistetään ei-metallisten tuotteiden käytössä tarvittavien eurooppalaisten ja suomalaisten suunnitteluohjeiden edistymistä.

Tämän esitutkimuksen tilaajana oli Tiehallinnon asiantuntijapalveluiden siltateknikka.

10 EI-METALLISET TUOTTEET

2.1 Ei-metallisten tuotteiden materiaalit

Ei-metallisten tuotteiden materiaalina ovat kuitulujitteiset polymeerit (Fiber Reinforced Polymer = FRP). Se on melko uusi komposiittimateriaali, jota valmistetaan kuituista ja hartsista sekä lisäaineista. Kuidut ovat tyypillisesti joko hiili- tai lasikuituja. Myös mm. aramid-kuituja ja eri kuitujen yhdistelmiä on käytetty. Hartsi tehdään usein polyesteristä (epoksi tai nailoni) tai uretaanilla modifioidusta vinyyliesteristä. Kanadalainen standardi /3 / hyväksyy kuituiksi hiili-, lasi- ja aramid-kuidut ja hartseiksi epoksin ja vinyyliesterin. Hartsi toimii sideaineena, joka sitoo ja suojelee kuituja sekä siirtää rasituksia kuitujen välillä. Mahdolliset lisäaineet ovat epäorgaanisia materiaaleja. Ei-metalliset tuotteet ovat tyypillisesti joko tankoja, punoksia, levyjä, nauhoja tai kangasta, kuva 1. Betonirakenteiden raudoitteiden asemasta näistä käytetään yleensä joko tankoja tai punoksia. Kuvassa 2 on esitetty neljän eri valmistajan FRP-tankoja ja -punoksia.

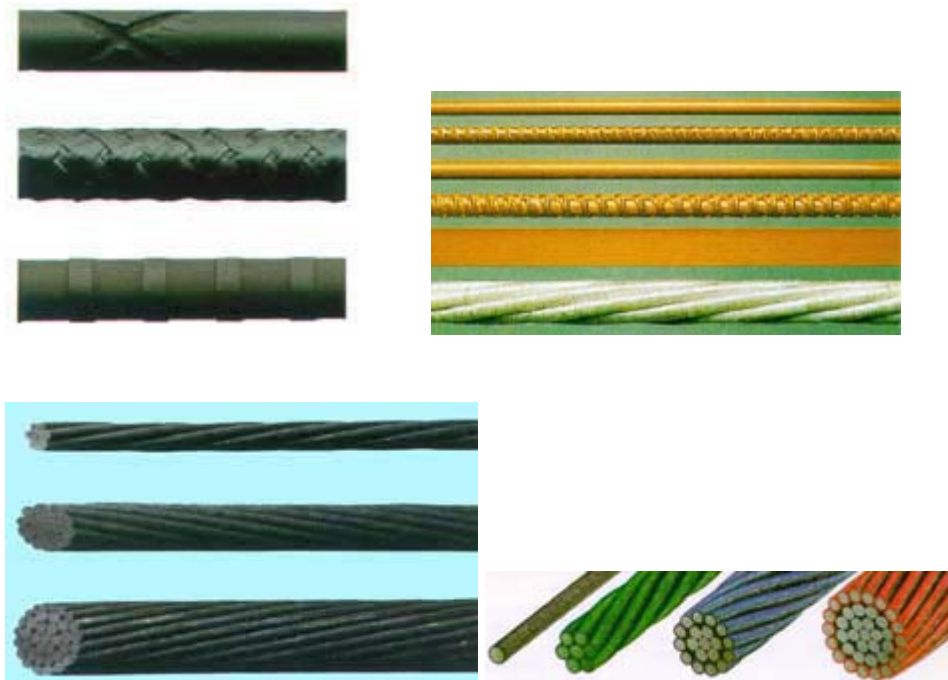


Kuva 1. Yleisesti käytettyjä lasi- ja hiilikuituja ja niistä tehtyjä raudoitteita korvaavia tuotteita / 32 /.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552



Kuva 2. FRP-tankoja ja punoksia neljältä eri valmistajalta / 17 /.

Käytettäessä lasikuituja betonissa on vaarana lasin aiheuttama alkaalireaktio, joka vaurioittaa betonia, mutta se on FRP:ssä poistettu käyttämällä alkaalin kestäviä E-lasikuituja. FRP-tankojen ja –punosten erilaisilla profiloinneilla on kokeiden mukaan saavutettu riittävät betonin ja ko. tankojen/punosten väliset tartuntalujuudet.

2.2 Ei-metallisten tuotteiden käyttö betonirakenteissa

Ei-metallisia tankoja ja punoksia voidaan käyttää betonirakenteissa korvaamaan tavanomaisia terästankoja tai jännepunoksia. Rakenteen vahvistamiseen ei-metallisia tuotteita käytetään esimerkiksi liimaamalla hiilikuitulevy palkin alapintaan. Myös joitakin erikoissovelluksia esitellään kohdassa 3.

2.2.1 Käyttö tavanomaisten raudoitteiden asemasta

Ei-metallisia tankoja voidaan käyttää tavanomaisen raudoitteen asemasta betonirakenteissa. Niiden materiaaliominaisuudet esitellään tarkemmin kohdassa 2.3. Seuraavassa on esitetty muutamia ei-metallisten tuotteiden käyttöön ja laatuun liittyviä erityisohjeita / 17, 3 /.

Käsittely ja varastointi

Ei-metalliset tangot ja punokset ovat hyvin kestäviä, mutta väärinkäytettyinä alttiita pinnan vahingoittumiselle. Terävällä esineellä tehdyt syvät viillot vähentävät niiden kestävyyttä ja siksi niiden huolellinen käsittely on tarpeen varastointi-, käsittely- ja asennusvaiheissa. Jos työmaan olosuhteet sallivat, ei-metalliset tangot ja punokset tulisi toimittaa erilliseen varastoon. Ei-metalliset tangot ja punokset pitäisi käsitellä, varastoida ja asentaa samoin kuin epoksinnoitetut tangot ja huolellisemmin kuin tavanomaiset teräkset.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

Seuraavat varastointi- ja käsittelyohjeet minimoivat tankojen ja punosten tai niiden käsittelijän vahingot:

- ∄ Ei-metallisia tankoja ja punoksia pitää käsitellä kestävillä työhansikkailla terävien kulmien aiheuttamien viiltojen estämiseksi.
- ∄ Jos tankoja ja punoksia varastoidaan ulkona asennettuna suoraan maaperälle, on niiden alle asennettava puualustat, jotta ne pysyvät irti maasta ja ovat helposti käsiteltävissä.
- ∄ Ei-metalliset tangot ja punokset ovat korroosionkestäviä, mutta ultraviolettisäteet (auringonvalosta) ja kemialliset aineet voivat aiheuttaa haitallisia pintavikoja jos niitä varastoidaan sellaisissa olosuhteissa pitkiä aikoja. Jos tankoja ja punoksia säilytetään ulkona, pitää ne peittää läpikuultamattomalla muovilla tai vastaavalla peitteellä. Suojaus kosteudelta ei ole tarpeen.
- ∄ Jos tankojen ja punosten päällä on öljyä, rasvaa tai likaa, on se poistettava ennen betonivalua pyyhkimällä tai ruiskuttamalla ne sopivalla liuottimella.
- ∄ Ei-metalliset tangot ja punokset ovat kevyitä ja joustavia verrattuna vastaaviin terästuotteisiin. Tanko- ja punosniput ja niiden nostot pitää tehdä varovaisesti. Kaikki työntekijät perehdytetään siihen, kuinka tangot ja punokset käyttäytyvät niitä käsiteltäessä.
- ∄ Ei-metalliset tangot ja punokset voi helposti ja nopeasti katkaista kulmahiomakoneella tai metallisahalla. Niitä ei pidä leikata.

Asennus

- ∄ Ei-metalliset tangot ja punokset sijaitsevat betonirakenteessa pääosiltaan samoin kuin teräsraudoitteet. Ellei hankkeessa ole muutoin ohjeissa määrätty, niiden sijaintitoleranssit ovat samat kuin standardeissa terästen osalta. Erityisesti on otettava huomioon, että ei-metalliset tangot ja punokset ovat hyvin kevyitä ja ne on siksi tuettava hyvin paikoilleen niin, että ne eivät siirry paikoiltaan betonoitaessa. Tankojen kohottamiseen oikeaan asemaan, joka on määritetty tangon halkaisijan mukaan, voidaan käyttää muovisia tai muita korroosionkestäviä välikkeitä. Tavaroiden laittaminen ja astuminen tankojen päälle on kielletty.
- ∄ Kun korroosionkestävyys ja metallien välttäminen on ehdoton vaatimus, voidaan tankojen sidontaan käyttää muovi- tai nailonsiteitä. Muutoin voidaan käyttää teräs-, ruostumaton teräs- tai pinnoitettuja punossiteitä. Ei-metallinen tanko voidaan liittää yhteen metallitangon kanssa, jos ei käytetä mekaanista kiinnikettä, joka voi vahingoittaa ei-metallista tankoa.
- ∄ Jos vaatimuksena on raudoituksen jatkaminen, voidaan käyttää limittämällä yhteen liitettyjä tankoja. Mekaaniset päistään yhdistetyt tai hitsaamalla yhteen liitetty tangot eivät ole mahdollisia. Limitetyn jatkoksen pituus riippuu betonin lujuudesta, betonityypistä, tangon koosta, sijainnista ja betonipeitteestä. Jos ei ole muuta ohjetta, on jatkospituutena käytettävä 40 kertaa tangon halkaisija.

Taivutukset

Ei-metallinen tanko tai punos on yleensä kuumuudessa kovettunut komposiitti ja sitä ei voi taivuttaa sen jälkeen kun se on polymerisoitunut (kovettunut). Jos tangot on

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

toimitettu täysin kovettuneina, niitä ei voi taivuttaa työmaalla. Taivutukset voidaan tehdä tankojen valmistusprosessissa ja niissä voidaan käyttää niitä kaikkia muotoja, joita vaaditaan terästangoiltakin. Vähän suurempia taivutussäteitä kuitenkin usein vaaditaan. Yleisohjeena voidaan pitää, että kertomalla tangon halkaisija kertoimella 3,5 saadaan minimi taivutussäde 90-asteen taivutukseen. Samoin saadaan minimi taivutussäde 180-asteen taivutukseen kertomalla tangon halkaisija kertoimella 7. Jos taivutuksen mitat ovat rakenteessa kriittisiä, on otettava yhteyttä toimittajaan, joka voi muuntaa tankojen taivutusominaisuuksia. Testeihin perustuen on todettu, että noin 50 – 60 % suorien tankojen suunnittelulujuudesta säilyy 90 asteen taivutuksessa.

Laadunvarmistus

Kanadalaisen ei-metallisten tankojen toimittajan mukaan tuotteiden valmistus on ISO 9002 sertifioitu. Laadunvalvontakokeita tehdään valmistuksen aikana rutiinimaisesti näytteiden ja valvonnan avulla jotta tuotteet täyttävät kaikki määräykset ja ovat mittatoleranssien mukaiset. Todistus laadunvarmistustuloksista on vaadittaessa saatavissa. Testausraportit ovat saatavissa myös riippumattomalta kolmannen osapuolen testauslaboratoriolta koskien seuraavia ominaisuuksia: mekaaniset ominaisuudet (mm. vetolujuus, väsytyslujuus ja kimmomoduuli), tartuntalujuus ja alkalinkestävyys (lasikuidun osalta erityisen tärkeitä betonirakenteissa).

2.2.2 Käyttö jänneraudoitteiden asemasta

Ei-metallisia tuotteita on käytetty betonirakenteissa myös jänneraudoitteiden asemasta sekä tartuntajänne- että ankkurijännerakenteiden valmistuksessa. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty myös hiilikuidusta valmistettuja jännepunoksia. Yksi ensimmäisiä siltoja, jossa käytettiin ei-metallisia jännepunoksia rakennettiin vuonna 1993 Calgaryssa Kanadassa. Siihen asennettiin myös optiset kuitusensorit rakenteen pitkäaikaisseurantaan varten. Sen jälkeen vastaavia siltoja on tehty pelkästään Kanadassa jo lukuisa määrä /10 /.

Ei-metallisia jännepunoksia on markkinoilla jo monia ja niiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1. Niiden edut käytettäessä jänneteräksen asemasta ovat kuten edelläkin korroosionkestävyys, suuri lujuus, keveys, magnetisoitumattomuus ja sähkön johtamattomuus. Käyttö- ja asennusohjeet ovat paljolti samoja kuin edellä esitetyt ohjeet *Käyttö tavanomaisten raudoitteiden asemasta*. Seuraavassa erityispiirteitä, kun ei-metallisia punoksia käytetään jänneraudoitteiden asemasta.

Ei-metallisten jännepunosten pakkauksissa on ollut ongelmia, kun niitä on toimitettu kelalla, jonka halkaisija on ollut suhteellisen pieni (1 – 2 m). Tällöin jänteen kuituihin tuli jännityksiä, jotka saattoivat olla 70 % niiden kapasiteetista. Suurentamalla kelan halkaisija noin kolminkertaiseksi, jännitykset puolittuivat.

Betonivalun aikana on kiinnitettävä huomiota siihen, etteivät kevyet ja jäykät tangot siirry paikoiltaan niiden joustavuuden ja tiivistyslaitteiden vuoksi. Ei-metalliset punokset eivät saa joutua kosketuksiin betonin tiivistyslaitteiden kanssa. Myös betonin liiallinen lämpökäsittely tai massiivisen rakenteen hydrataatiolämpö (> 80°C) voi vahingoittaa ei-metallista punosta. Ei-metallinen jännepunos voidaan tarvittaessa myös yhdistää teräspunokseen esimerkiksi kuvan 3 mukaisesti.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552



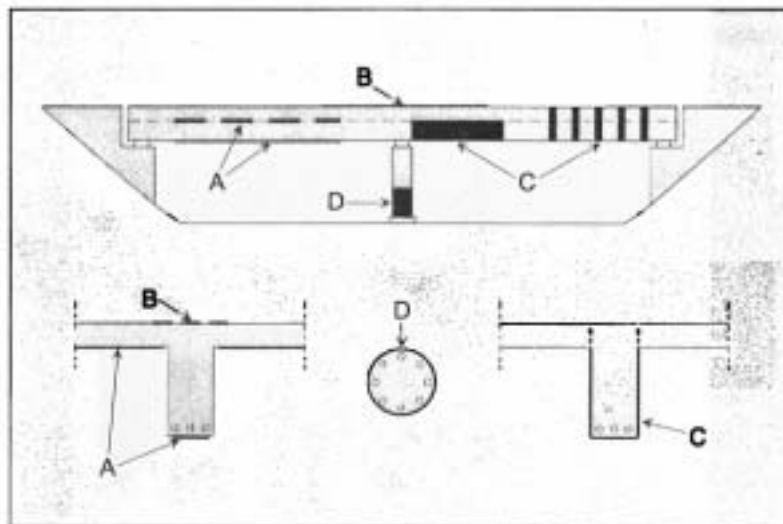
Kuva 3. Ei-metallisen jätteen liittäminen teräspunokseen / 21 /.

2.2.3 Käyttö betonirakenteen vahventamisessa

Viimeisen kymmenen vuoden aikana on kehitetty liimattavia ei-metallisia hiilikuitu- tai lasikuitupohjaisia lujitteita betonirakenteiden (laatat, palkit ja pilarit) vahventamiseen. Ensimmäinen betonisillan vahventaminen hiilikuiduilla tehtiin Suomessa vuonna 1998. Tämän jälkeen on vahventamisia tehty jo useille silloille /22 /. Myös talonrakentamisessa on tehty vastaavia betonirakenteiden vahventamisia liimattavilla hiilikuitulujitteilla.

Tiehallinnon siltateknikka on kehittänyt liimausta vahventamismenetelmänä betonisiltoihin sovellettuna. Kokemuksia on hyödynnetty tekemällä suunnitteluohje / 38 /, jonka koeversio on ollut käytössä jo kaksi vuotta ja joka viimeistellään vuoden 2005 aikana.

Periaatekuvat betonisillan vahventamisesta hiilikuitunauhoilla on esitetty kuvissa 4 ja 5.

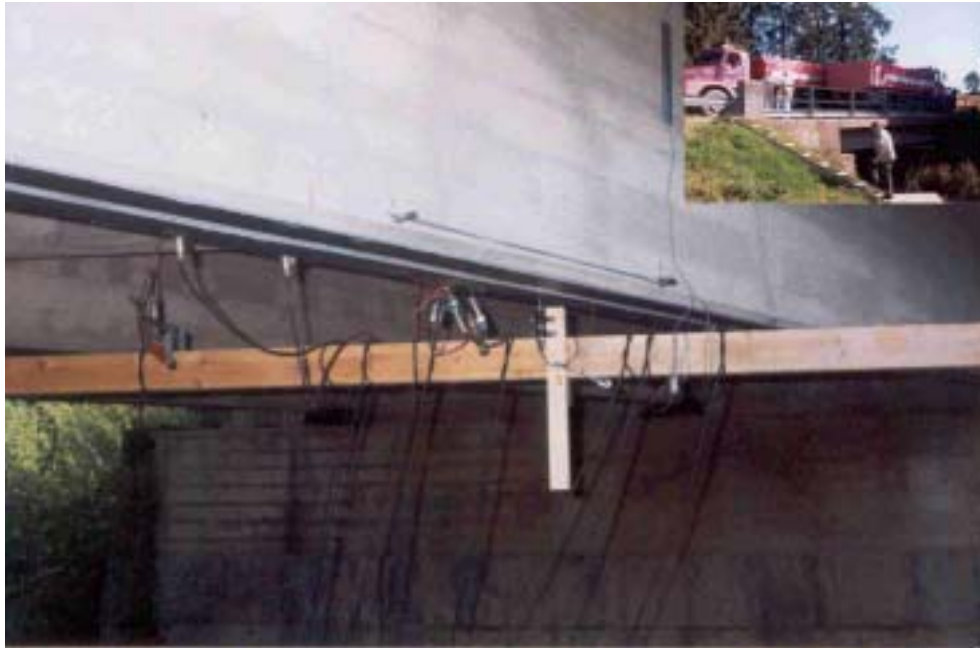


Kuva 4. Betonisillan liimausvahvennuskohteita (A kentän taivutus, B välituen taivutus, C leikkaus ja D pilari) / 22 /.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552



Kuva 5. Vahvennettu Lemulan silta ja sen koekuormituksen mittausrakenteita / 17 /.

Vahventamisen periaate käyttäen hiilikuitulevyä, -nauhaa tai -kangasta on lyhyesti seuraava. Ruostumattomat hiilikuituvahvikkeet liimataan rakenteen vetopuolelle vahvalla epoksiliimalla. Muita ankkurointeja ei tarvita. Aiheesta on jo paljon kotimaista ja ulkomaista kirjallisuutta, jossa on esitetty yksityiskohtaisia ohjeita ja lähdeluettelossa on näitä lähteitä esitetty muutama / 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 /.

2.3

Ei-metallisten tankojen ja punosten ominaisuudet ja vertailu tavanomaiseen raudoitukseen

Ei-metallisten tankojen ja punosten ominaisuudet määräytyvät kolmen komponentin ominaisuuksien mukaan: orgaanisten tai epäorgaanisten kuitujen, polymeerihartsien ja mahdollisten epäorgaanisten lisäaineiden mukaan. Fysikaaliset ominaisuudet ovat riippuvaisia kuitujen mekaanisista ominaisuuksista, kuitujen suunnasta, pituudesta, muodosta, kuitujen mahdollisesta yhdistelystä, hartsin mekaanisista ominaisuuksista ja kuitujen ja hartsin välisestä tartunnasta. Myös lisäaineilla voi olla vaikutusta fysikaalisiin ominaisuuksiin.

Taulukossa 1 on esitetty jänneteräksen ja eri kuitujen keskimääräisiä lujuusominaisuuksia.

Taulukko 1. Jänneteräksen ja kuitujen keskimääräisiä lujuuksia / 21 /.

Kuidun ominaisuus	Lasi	Aramid			Hiili		Teräs
	E-tyyppi	Kevlar	Twaron	Technora	Pitch	Pan	
Kimmokerroin, GPa	72-78	125-131	122-127	80	410-550	195-230	205
Vetolujuus, GPa	3,4-3,6	3,6-4,1	2,5-2,9	3,1-3,4	7,7-9,8	3,4	1,9
Tiheys, g/cm ³	2,54-2,62	1,4-1,5	1,4-1,5	1,39	1,65	1,75	7,85
Halkaisija, µm	3,0-20,0	12	12	12	9,0-18,0	5,0-8,0	Ei vertailtavissa
Murtovenymä, %	3,5-5,0	2,5-3,0	2,0-4,0	4,4-4,6	2,1-2,5	1,3-1,8	7,0

Harjateräksellä vetolujuus on usein noin 0,6 GPa ja murtovenymä noin 12 %. Ei-metallisten kuitujen vetolujuus on parhaimmillaan 2-5-kertainen verrattuna jänneteräkseen ja jopa 20-kertainen verrattuna harjateräkseen. Ei-metallisten tankojen vetolujuudet ovat kuitenkin pienempiä, sillä hartsin vetolujuus on oleellisesti pienempi kuin kuiduilla.

Taulukossa 2 on esitetty ei-metallisten tankojen ja punosten hartsien lujuusominaisuuksia.

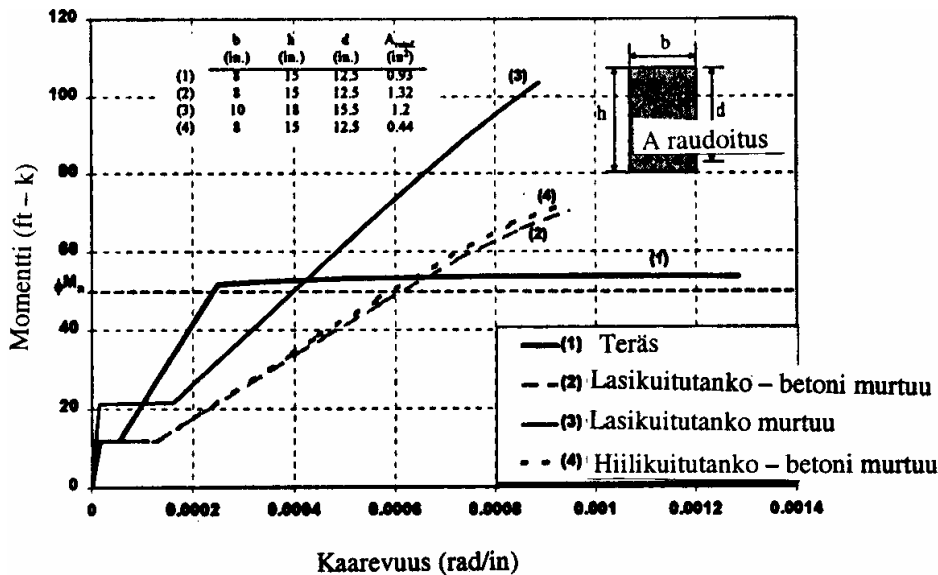
Taulukko 2. Hartsien keskimääräisiä lujuusominaisuuksia

Ominaisuudet	Epoksi	Vinyyliesteri
Kimmokerroin, GPa	2,5-4,1	2,1-4,1
Vetolujuus, MPa	55-130	20-100
Murtovenymä, %	1,0-9,0	3,0-5,0
Tiheys, g/cm ³	1,1-1,3	1,0-1,45

Taulukoiden 1 ja 2 lujuustiedot kuiduille ja hartseille ovat ko. materiaalien lyhytaikaisarvoja (ominaisarvoja). Pitkäaikaislujuudet (suunnittelulujuudet) lasketaan suunnitteluohjeissa / 1 / annettujen olosuhteista riippuvien kertoimien avulla. Ei-metallisten tuotteiden valmistajat ilmoittavat usein molemmat arvot. Valmistajien ilmoittamat takuuarvot vetolujuuden suunnitteluarvoksi ovat merkittävästi pienempiä kuin taulukossa 1 ilmoitetut. Esimerkiksi hiilikuitutangolle annetaan vetolujuuden suunnitteluarvon takuuarvoksi 1,6 GPa / 17 /. Suunnittelulujuuden takuuarvo on laskettu tällöin vähentämällä ominaisarvosta 3 x keskihajonta. Tällöin hiilikuitutangon vetolujuus on noin 2,5-kertainen verrattuna teräksiseen harjatankoon.

Kun käytetään ei-metallisia tankoja ja punoksia betonirakenteessa, on rakenteen murtuminen ns. haurasmurto. Tällöin ei rakenne varoita murtumisesta samoin kuin käytettäessä teräksestä tehtyjä raudoitteita. Ei-metallisten tankojen ja punosten murtoveny-

mä on usein pienempi kuin teräksellä, taulukot 1 ja 2, ja niiden myötääminen jännityksen pysyessä samana on oleellisesti pienempää kuin teräksellä. Rakenne vaurioituu silloin äkillisesti. Sen vuoksi on ei-metallisen tangon ja punoksen lujuuden ja käyttötilan kriteerien oltava riittäviä. Ei-metallisten tankojen ja punosten sitkeyden puute korvataan mitoituksessa korkealla lujuusreservillä. Varmuuskerroin rakenteen vaurioitumisen varalta on siksi oltava korkeampi kuin teräs- tai jännebetonirakenteessa perinteellisesti. Se on mahdollista johtuen ei-metallisten tankojen ja punosten korkeista lujuusominaisuuksista /1/. Kuvassa 6 on esitetty betonipalkin teoreettinen murtumismalli erilaisille raudoitteille, joilla on sama kapasiteetti. Siinä on käytetty teräs-, lasikuitu- ja hiilikuitutankoja betonipalkissa. Poikkileikkauksessa, jossa tapahtuu lasikuitutankojen murto, betonipoikkileikkauksen mitat ovat suuremmat kuin muissa palkeissa, jotta sillä on sama kapasiteetti. Ottaen huomioon edellä esitetty olisi Suomessa harkittava, että aluksi ei-metallisia tankoja ja punoksia käytettäisiin silloissa vain säilyvyyden kannalta kriittisissä osissa kuten reunapalkeissa.



Kuva 6. Betonipalkin teoreettinen murtumismalli käytettäessä perinteellistä raudoitusta tai ei-metallisia tankoja / 1 / (!amerikkalaiset yksiköt).

Ei-metallisten tankojen ja punosten pitkäaikaisominaisuuksia on tutkittu paljon, mutta käytännön kokemuksta näistä ei ole vielä kenelläkään kuin noin 15-20 vuoden ajalta. Tähän asti kertyneet kokemukset pitkäaikaisominaisuuksista ovat olleet enimmäkseen positiivisia. Viruminen on tutkimuksissa todettu merkittäväksi ongelmaksi lasikuitutangoille. Hiilikuitutangoilla se on merkittävästi vähäisempää. Tämä ominaisuus on tunnettu ja sen mittausta varten on kehitetty standarditesti. Tämä otetaan rakenteen mitoituksessa huomioon, kun määritellään suunnittelulujuuksia ns. ympäristökertoimen avulla. Tämä kerroin annetaan erikseen eri materiaaleille eli hiilelle, lasille ja aramidille /1/.

Taulukoista 1 ja 2 nähdään myös, että ei-metalliset tangot ovat noin neljä kertaa kevyempiä kuin terästangot. Ei-metallisten tankojen (lasikuidut) lämpölaajeneminen on vielä lähempänä betonin lämpölaajenemista kuin teräksellä.

Epäorgaanisia lisäaineita käytetään mm. hartsin määrän pienentämiseen. Lisäaineet pienentävät näin materiaalin hintaa heikentämättä merkittävästi sen ominaisuuksia. Ne

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

voivat esimerkiksi lisätä lujuutta tai viskositeettia, muuttaa väriä tai parantaa kemikaalien tai UV-säteilyn kestävyttä. Lisäaineet vaihtelevat sisällöltään, tyypiltään ja määrältään tuotteittain ja ovat usein merkittävin ero eri tuotteiden välillä.

Hyvien lujuusominaisuuksien ja keveyden lisäksi ei-metallisten tankojen ja punosten seuraavat ominaisuudet poikkeavat edukseen verrattuna tavanomaisiin raudoitteisiin:

- € korroosionkestävyys (hyvä kloridien ja muiden kemikaalien kestävyys)
- € eivät ruostu karbonatiseerattuna betonissa
- € eivät johda sähköä (riippuu kuitutyypistä: hiilikuitu johtaa sähköä)
- € hyvä lämmöneristyskyky; ei toimi kylmäsiirtäjä
- € magneettikentällä ei vaikutusta.

Rakenteen säilyvyyden kannalta tavoitteeksi käytettäessä ei-metallisia tankoja ja punoksia voidaan harkita betonin halkeiluvuorokkeen rajoittamista nykyistä pienemmäksi. Tällöin vähenisi kloridien tunkeutuminen betoniin ja täten betonin vaurioituminen.

Ei-metallisten tankojen ja punosten ominaisuuksien ongelmina voidaan pitää niiden

- € huonohkoa UV-valon kestävyttä (vaatii suojausta pitkäaikaisvarastoinnissa)
- € taivutukset tehtävä tehtaalla (valmistusprosessista johtuen)
- € palonkesto-ominaisuuksia, jotka eivät aina riitä talonrakennuskohteissa; sillanrakennuksessa tämä ei yleensä ole ongelma
- € pitkäaikaisominaisuuksista ja siltojen tai rakennusten rakentamisesta ei ole vielä kokemustietoa kovin pitkältä ajalta (noin 20 vuoden ajalta on); arviona kestoiksi on kuitenkin esitetty vähintään 75 vuotta / 36 /.

Testien mukaan ei-metallisilla tangoilla ja punoksilla on myös melko hyvä palonkesto (huonompi kuitenkin kuin teräksellä) ja hyvä väsytytkuormituksenkesto. Ei-metallisten tankojen ja punosten vaikutuksesta betonirakenteen pakkasenkestävyyteen on myös tutkittu ulkomailla useissa eri maissa ja käytännön kokemustenkin mukaan USA:ssakaan ei siinä ole ollut erityisen merkittäviä ongelmia (vetolujuus pieneni noin 10 % / 37 /). Tulokset ja koejärjestelyt kuten lämpötilat ja jäädytys-sulatuskertojen määrä kuitenkin vaihtelevat. Suomessa on kysymys myös suola-pakkasrasituksesta. Sen vuoksi Suomen olosuhteissa tämä asia on aiheellista vielä tarkistaa, sillä tähän liittyviä tutkimustuloksia ja kokemustietoa ei vielä löydy kovinkaan paljon Suomesta. Tästä aiheesta Suomessa tehdyt kokeet ja kokemustieto muutamalta vuodelta liittyvät liimattujen hiilikuitunauhojen käyttöön betonirakenteiden vahvistamisessa. Ei-metallisten tankojen ja punosten taloudellisuus on käsitelty kohdassa 2.4.

Talonrakentamisessa käytetään nykyisin korroosioherkissä rakenteissa kuten julkisivuissa usein ruostumatonta terästä tavanomaisen teräksen tilalla. Tällöin ei-metallisen tangon kilpailija on siis ruostumattomasta teräksestä tehty tanko.

Ei-metallisten tankojen ja punosten käyttöä betonirakenteissa on tutkittu varsin paljon jo vuosikymmenien ajan eri maissa. Tutkittavaa riittää silti vieläkin ja ajankohtaisia tärkeitä tutkimusaiheita USA:ssa ovat nyt / 13, 16, 19 /:

Betonirakenteiden vahvistaminen FRP:llä:

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

- € Mekaanisten kiinnikkeiden käyttö FRP-nauhojen kiinnityksessä betonirakenteeseen.
- € Terästankojen väsytytkuormituksen kestävyys ja halkeamien synty FRP:llä vahvistetuissa betonirakenteissa.
- € Eri työmenetelmien edut ja haitat erilaisissa kohteissa.
- € FRP-vahvistusten monitorointi, ainettarikkomaton testaus ja tarkastus.

FRP:llä lujitetut betonirakenteet:

- € Betonissa olevien FRP-tankojen pitkäaikaisominaisuuksien arviointi aidoissa olosuhteissa.
- € FRP:llä lujitettujen betonirakenteiden uusi leikkaussuunnittelumalli. Teräsbetonirakenteen perinteellinen leikkauskäyttäytymismalli ei sovellu kovin hyvin FRP:llä lujitetulle betonirakenteelle / 13 /.

2.4 Ei-metallisten tankojen ja punosten käytön taloudellisuus

FRP-tangot ja -punokset ovat materiaalikustannuksiltaan korkeampia kuin tavanomaiset teräsraudoitteet, mutta halvempia kuin ruostumattomasta teräksestä tehdyt raudoitteet. Edullisimmillaan FRP-tangon (lasikuitu) hinta on noin 3-kertainen verrattuna terästangon hintaan. Kun otetaan huomioon FRP-tangon (hiilikuitu) suurempi vetolujuus (2,5-5 kertaa teräksen lujuus), paranee sen kilpailukyky oleellisesti ollen samaa suuruusluokkaa kuin lasikuidullakin. Taulukossa 3 on esitetty erilaisten raudoitetankojen yksikköhintoja (v. 2005). Hiilikuitutankojen hintakilpailukyky parantui oleellisesti, kun hiilikuitujen hinnat laskivat 1990-luvulla noin 70 %.

Taulukko 3. Teräs- ja FRP-tankojen yksikköhintoja, ALV 0 % (tammikuu v. 2005).
FRP-tankojen hinnat: myyntihinnat Kanadan tehtaalta.

Materiaali	Yksikköhinta
FRP, lasikuitu	~1,00 €/m, ø10mm
FRP, hiilikuitu	~6,0 €/m, ø10mm
Teräs	0,57 €/kg = 0,35 €/m, ø10mm
Ruostumaton teräs	5,63 €/kg = 3,44 €/m, ø10mm

Taulukosta 3 nähdään, että FRP-tankojen hintakilpailukyky materiaalikustannusten osalta on nyt hyvä ruostumattomaan teräkseen nähden kun otetaan huomioon eri materiaalien lujuudet. Lisäksi on syytä ottaa huomioon, että teräksen ja ruostumattoman teräksen hinta ovat olleet maailmalla voimakkaasti nousemassa viime aikoina.

FRP:n käytön taloudellisuuslaskelmiin (elinkaarikustannuslaskelmiin) otetaan huomioon rakenteen suunnittelukäyttöään mukainen elinkaari. FRP:n käytön taloudellisuutta arvioitaessa on otettava huomioon mm. seuraavat edut, jotka kompensoivat FRP:n korkeita materiaalikustannuksia:

- € Hyvät korroosionkesto-ominaisuudet vähentävät huolto- ja korjaustarvetta ja pidentävät rakenteen käyttöikä.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

- € FRP:n keveys vähentää rakenteen painoa.
- € FRP:n keveys helpottaa raudoitteiden käsittelyä ja vähentää kuljetuskustannuksia.
- € Betonin karbonatisoituminenkaan ei aiheuta raudoitteiden korroosiovaaraa.
- € Rakenteen dimensiot (betonipeitteen paksuus pienenee) pienenevät. Betonin materiaalikustannukset pienenevät. Rakenne kevenee ja saavutetaan tilan säästöä.
- € FRP:n kuormakapasiteetti on korkea.
- € FRP ei toimi kylmäsiirtimänä. Säästöä energiakustannuksissa.
- € FRP:n kuormakapasiteetti on korkea.
- € Magneettikentällä ei vaikutusta.
- € FRP (lasikuitu) ei johda sähköä.

Näiden etujen taloudellinen merkitys on arvioitava sovelluskohtaisesti. Näihin laskelmiin on otettava mukaan myös FRP-tuotteista mahdollisesti aiheutuvat lisäkustannukset kuten työmenetelmien ja varastoinnin osalta. Kohdassa 6 on tehty esimerkkisillan osalta elinkaarilaskelma, jossa em. edut ja haitat on arvioitu.

11 RAUDOITTEIDEN ASEMASTA KÄYTETTÄVIEN EI-METALLISTEN TUOTTEIDEN KÄYTTÖKOhteET

Ei-metalliset tangot ja punokset on ulkomailla otettu käyttöön erityisesti silloin, kun on ollut suuri riski raudoituksen korroosiolle, kuten merisatamissa ja jos rakenteet ovat alttiina jäänestosuolalle kuten sillat ja pysäköintitalot. Joissakin tapauksissa on ollut kysymys rakenteista, missä laitteet ovat aiheuttaneet sähkö- tai magneettikenttiä raudoitusten ympärille. Edellä esiteltyjen ei-metallisten tuotteiden lisäksi on käytetty myös samoista materiaaleista tehtyjä sideneuloja, pultteja ja muttereita / 31, 17 /. Läheteeseen / 31 / vuodelta 2003 on kerätty eri maista 26 esitystä monista erilaisista FRP:n käyttösovelluksista. Aineisto perustuu kansainväliseen kongressiin Bostonissa, U-SA:ssa. Sen teemana oli raudoitusta korvaavien FRP-tuotteiden sovellukset.

FRP-tuotteiden käyttösovellusesimerkit jaetaan tässä yhteydessä kolmeen ryhmään:

1. Infrakohteiden esimerkkejä
2. Talonrakennusesimerkit
3. Sillanrakennusesimerkit

Valtaosa jo toteutetuista FRP-tuotteiden käyttökohteista on betonisilloja ja ne esitellään kohdassa 4. Talonrakennusesimerkit esitetään tässä vain lyhyesti.

3.1 Infrakohteiden esimerkkejä

Tunnelien vahvistaminen

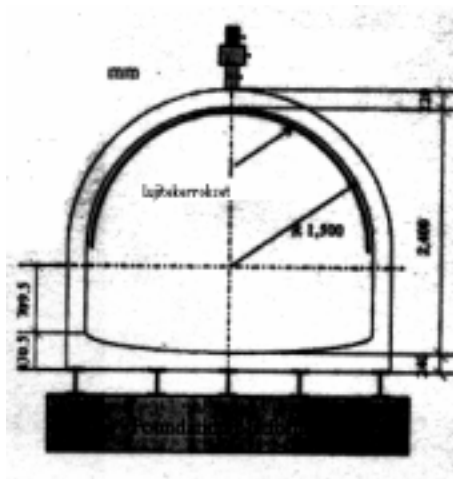
Japanissa on testattu ei-metallisia FRP-tuotteita katostaan vaurioituneen rautatie- ja maantietunneleiden betonirakenteiden vahvistamiseen ja näin tunnelien käyttöiän pidentämiseen / 33 /. Kuvassa 7 on esitetty mallinnusesimerkki tunnelin vahvistamisesta

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

FRP-kankaalla. Tulokset ovat olleet lupaavia, mutta on myös todettu jatkotutkimusten tarve.



Kuva 7. Betonitunnelin vahvennus FRP-kankaalla (malli) / 33 /.

Valmistajan mukaan ei-metallisia FRP-tuotteita on käytetty mm. Pariisin ja Ateenan metrotunneleissa / 17 /.

Satamarakenteet

Ei-metallisten tankojen kestävyys tekee niistä sopivia ankariin olosuhteisiin kuten satama-altaat, telakat, aallonmurtajat ja laiturit (toteutettu esimerkiksi Qatarissa) / 14, 17 /.

Paalut

Paaluraudoituksena ei-metallisia tankoja on käytetty sekä sillan- että talonrakennuksessa / 17 /.

Pengerrykset

Ei-metallisia maaperäneuloja ja kallioipultteja on käytetty monissa raudoiteverkon kiinnityksissä pengerrysten ja kallioseinämien tuennassa / 17 /.

Sähköpylväät

Saksassa on vuonna 2000 rakennettu sähköpylväitä, jossa on käytetty esijännitettyjä hiilikuitujännelankoja /34/.

3.2 Talonrakentamisen esimerkit

Talonrakentamisessa ei-metallisia tuotteita on käytetty ulkomailla seuraavissa sovelluksissa:

- € betonipalkkien ja laattojen vahvistaminen liimattavilla hiilikuitunauhoilla
- € paaluissa raudoitteiden asemasta
- € julkisivujen verhouslevyissä ja ikkunapenkeissä /34/
- € betonisandwich-elementtien sideneuloina
- € parveke-elementeissä
- € uima-altaissa sisätiloissa

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

- ∅ harkkoseiniä saumoissa tai seinien vahvistuksina
- ∅ pysäköintitaloissa
- ∅ laattojen yläpinnan vahvistuksina (pysäköintitalon korjaus) /11, 12 /.

Näissäkin käyttösovelluksissa voisi olla mahdollisuuksia myös Suomessa. Asiaa ei ole vielä Suomessa tutkittu tarkemmin paitsi betonirakenteiden vahvistamisen osalta.

12 EI-METALLISTEN TANKOJEN JA PUNOSTEN KÄYTTÖ SILLOISSA

Esimerkki Englannista

Fidgettin kävelysilta Chalgrovessa Oxfordshiressä Englannissa oli ensimmäinen kävelysilta Englannissa ja ilmeisesti myös Euroopassa, joka raudoitettiin pelkästään ei-metallisilla tangoilla, kuva 8. Se rakennettiin vuonna 1995. Silta koekuormitettiin ja sen ominaisuuksia seurattiin tarkoin vuoden ajan ja mitään merkittäviä ongelmia ei ilmennyt. Englannissa on tehty jo lukuisia kävelysilloja FRP:n avulla / 15 /.



Kuva 8. Fidgett-kävelysilta Englannista / 17 /.

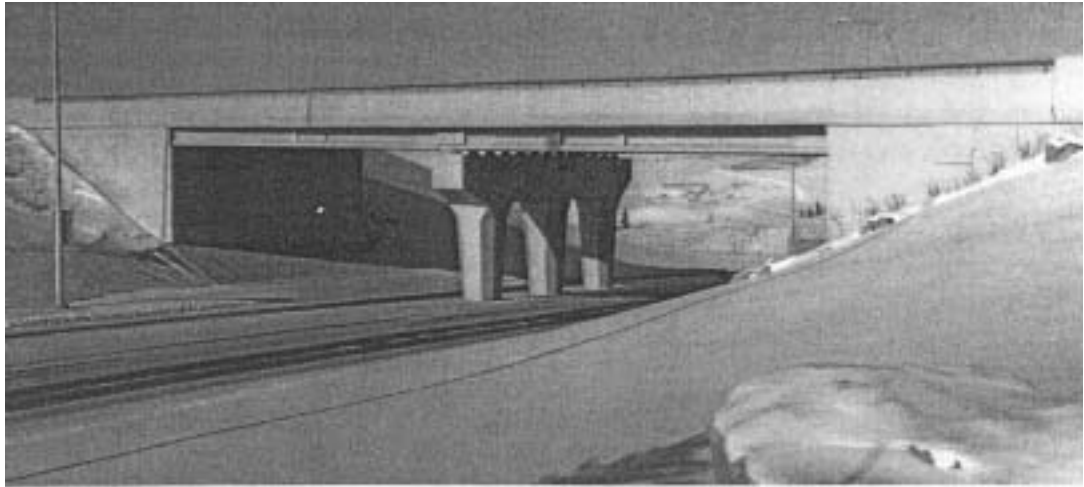
Esimerkki Kanadasta

Calgaryssa Kanadassa on yksi vanhimpia siltoja, Beddingtonin silta, jossa on käytetty ei-metallisia punoksia, kuva 9. Se on kaksiaukkoinen silta kokonaispituudeltaan 43 ja rakennettu vuonna 1993. Elementtipalkeista on osa jännitetty hiilikuitupunoksilla.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

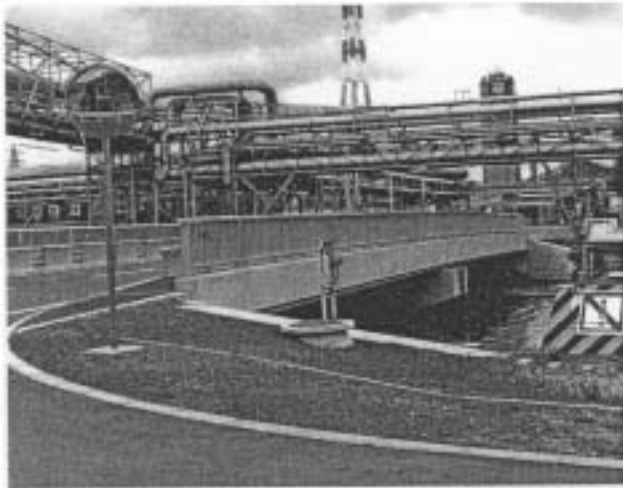


Kuva 9. Beddingtonin silta Calgaryssa / 10 /.

Esimerkit Japanista

Japanissa on ilmeisesti eniten erilaisia ei-metallisilla tangoilla tai punoksilla toteutettuja betonisilloja, joista seuraavassa viisi esimerkkiä (sillan vahvistusesimerkki mukana).

Kuvassa 10 on japanilainen kaksiaukkoinen maantiesilta kemikaalitehtaalta. Sillassa on ei-metalliset tangot ja punokset. Kuvassa 11 on japanilainen kävelysilta jänneväliltään 9 m. Se on jännitetty hiilikuitujännteillä. Pisin silta Japanissa ei-metallisilla jännteillä on Hishon silta, jonka kokonaispituus on 110 m ja suurimman aukon jänneväli on 75 m.



Kuva 10. Kaksiaukkoinen maantiesilta Japanista / 10 /.

Juha Ratvio

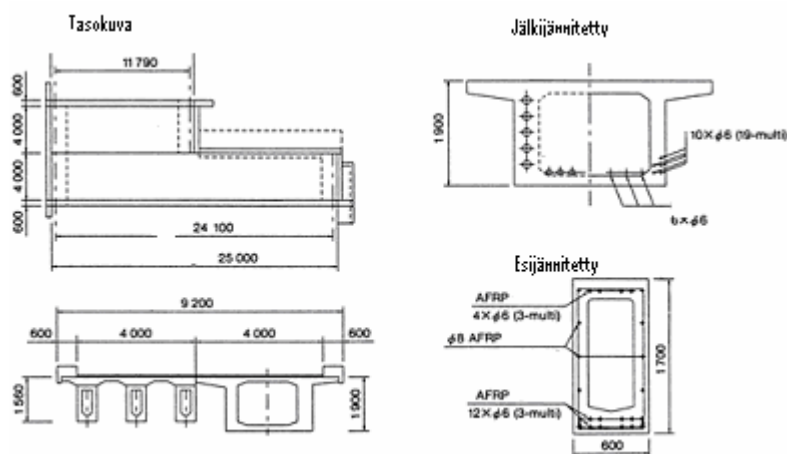
21.4.2005

A-5552



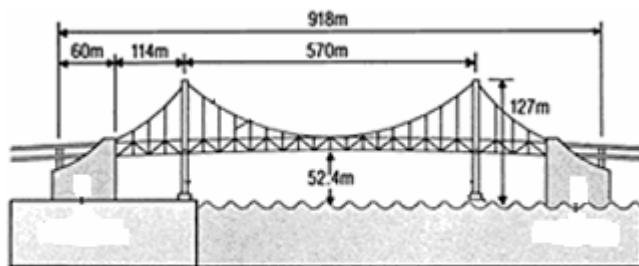
Kuva 11. Japanilainen kävelysilta jännitettyä hiilikuitujänteillä / 10 /.

Kuvassa 12 on esitetty piirustuksia japanilaisesta sillasta, joka on jännitetty aramid-kuitujänteillä. Silta on rakennettu vuonna 1996 / 30 /.



Kuva 12. Taso- ja poikkileikkaus sillasta, joka on raudoitettu aramid-kuitujänteillä / 30 /.

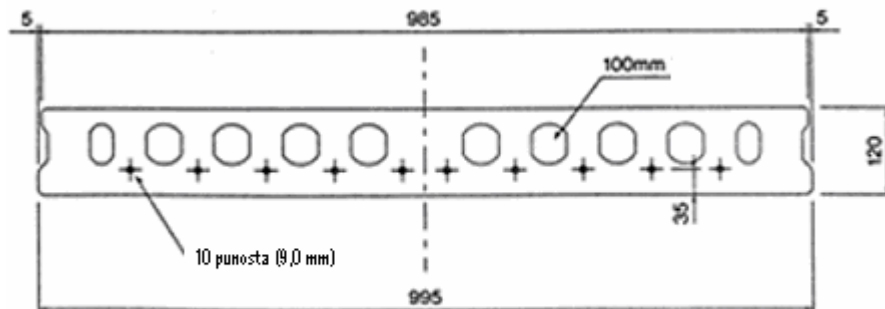
Kuvassa 13 on esimerkki japanilaisesta Rainbow-sillasta, jonka siltakannen ontelolattat ovat elementtejä ja ne on jännitetty aramid-kuitujänteillä. Silta on rakennettu vuonna 1996 Tokioon.



Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552



Kuva 13. Rainbow-sillan päämitat ja kansilaattaelementin geometria / 30 /.

Betonisilltojen vahvistamiseen on usein käytetty Japanissakin liimattavia hiilikuitunauhoja. Kuvassa 14 on sillan vahvistamiseen liittyvän FRP-lujitteiden käytön erikoissovelluksen esimerkkisilta Japanista vuodelta 1996. Siinä on käytetty aramid-kuitujäniteitä sillan ulkoisessa jännittämisessä, kun siltaa on kunnostettu ja vahvistettu. Aramid-kuitujäniteitä on käytetty palkin uumaan kiinnitettävien konsolien kiinnityksiin, 6 kpl /konsolipari. Palkin ulkopuolelle tulevat pitkittäiset kaapelit olivat terästä.



Kuva 14. FRP-jäniteitä käytetty konsolien kiinnityksessä / 30 /.

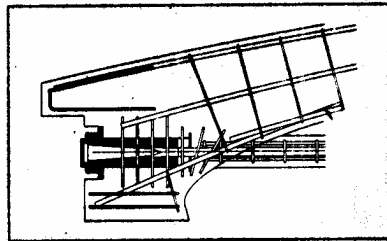
Tämän raportin kansikuvassa on esimerkki yhdestä japanilaisten käyttämästä hiilikuitujäniteiden (3 kpl) ankkurointimenetelmästä siltarakenteessa / 30 /.

Esimerkki Norjasta

Oppegårdin kävelysilta, kuva 15, sijaitsee Osllossa. Sen jänneväli on 10 m ja se kestää myös traktorin painon. Pääraudoitteiden asemasta on käytetty lasikuitujäniteitä ja se on rakennettu vuonna 1996. Jännitetyt palkit on instrumentoitu niin, että niiden käyttäytymistä voidaan seurata jatkuvasti. Kuvassa 16 on esitetty tämän sillan jännepunosten ankkurointi.



Kuva 15. Opegårdin kävelysilta / 17 /.



Kuva 16. Jännepunosten ankkurointi Opegårdin sillassa / 14 /.

Norjalaiset ovat todenneet, että käytettäessä FRP-tankoja pienissä yksiaukkoisissa silloissa, voitaisiin siltakannen erillinen vedeneristys jättää pois. Tämä edistäisi FRP-tankojen käytön taloudellisuutta / 14 /.

Esimerkki USA:sta

USA:ssa on jo toteutettu useita siltoja ei-metallisilla tangoilla ja punoksilla. Kuvissa 17 ja 18 on esitetty yksi FRP:n käytön erikoissovellus, FRP-komposiittisilta. Siinä on sillan kansilaatassa käytetty lasikuitukankaita, hartsia, polymeeribetonia, tavanomaista betonia ja epoksinnoitettuja terästankoja (laatan kaiteessa) ja se on yksi tarkimmin tutkittuja ja dokumentoituja / 18 / FRP-siltoja. Se ylittää Bennets Creekin joen New Yorkin osavaltiossa valtatiellä 248 ja se valmistui vuonna 1999.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552



Kuva 17. Valmis silta avattuna juuri liikenteelle / 18 /.



Kuva 18. Sillan koekuormitus / 18 /.

Esimerkki Sveitsistä

Ensimmäinen silta, jossa sillan vinoköysiin käytettiin hiilikuitukaapeleita löytyy Sveitsistä Storchenbruckin silta Winterthurista, kuva 19. Kahdessa vinoköydessä 24:stä käytettiin hiilikuitukaapeleita vuonna 1997.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552



Kuva 19. Storchenbrücken silta Sveitsistä / 10 /.

13

SUUNNITTELUOHJEET

Ei-metallisten tankojen ja punosten käyttöön betonirakenteissa (tavanomaisen tai jännäraudoituksen asemasta) on viime vuosina laadittu eri maissa ohjeita / 1, 3, 4, 5, 7, 8 / ja pisimmälle on edetty Kanadassa, jossa on vuonna 2002 julkaistu standardi ”FRP-lujitteisten rakennuskomponenttien suunnittelu ja rakentaminen”. Japanissakin on tämä asia jo ehtinyt standardoinnin asteelle, mutta japanilaisten suunnittelun perusteet ovat erilaiset kuin länsimaissa yleensä. Ko. suunnitteluohjeita on tehty myös Norjassa, Englannissa ja USA:ssa. EU:ssa laaditaan parhaillaan vastaavia ohjeita. Kansainvälisesti tätä asiaa edistetään järjestössä fib (International Federation of Structural Concrete) ja myös tämän alueen tutkimuslaitosten ja yritysten yhteistyöjärjestössä COBRAE. Suomessa ei tähän ole vielä merkittävästi panostettu.

Ei-metallisten tuotteiden käyttö betonirakenteiden vahventamisessa (liimattavat hiilikuitunauhat) on siis jo Suomessa käytössä ja tälle alueelle on suomalaisiakin ohjeita / 28 /. Niitä ei tässä yhteydessä tarkastella lähemmin. Seuraavassa tarkastellaan suunnitteluohjetilannetta maittain.

Kanada

Kanadalainen suunnittelun ja rakentamisen standardi FRP:n käytöstä rakennuskomponenteissa / 3 / sisältää seuraavat pääosat:

1. Yleiset suunnitteluperusteet
2. Rajatilat ja kuormat
3. FRP-komponenttien ja -lujitemateriaalien ominaisuudet
4. Betonirakenteiden suunnittelu käyttäen FRP-tuotteita

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

5. Jännitettyjen betonirakenteiden suunnittelu käyttäen FRP:tä
6. Betonirakenteiden vahventaminen pintaan liimattavalla FRP:llä
7. Suunnittelu maanjäristysalueille
8. Betoniverhoukslevyjen suunnittelu käyttäen ei-metallisia kuituja
9. Rakentaminen.

Vastaava standardi kuin nyt on kanadalaisilla koskien ei-metallisten FRP-tuotteiden käyttöä betonirakenteissa, tarvitaan kohteita toteutettaessa myös Suomessa. Tämä kanadalainen standardi soveltunee varsin pienin muutoksin myös meille. Kanadalaiset ovat tehneet usean vuoden aikana runsaasti tutkimustyötä, mihin ko. standardi paljolti perustuu.

Norja

Norjalaiset ovat tehneet jo vuonna 1998 ei-metallisten FRP-tuotteiden käyttöä varten sovellusohjeen / 6 / heidän omalle betoninormilleen. Siinä on kuitenkin todettu, että tässä asiassa puuttui vielä vuonna 1998 ei-metallisten FRP-tuotteiden kansainvälisiä tuote- ja testausstandardeja. Samoin todettiin tarvetta ko. materiaalien varmuuskertoimien ja entistä laajemman muuntokerroinjärjestelmän kehittämiseksi. Norjalaiset tekivät tämän sovellusohjeen eurooppalaisen Eurocrete-projektin (1993 – 1997) tulosten perusteella.

Näiden ohjeiden / 6 / avulla on Norjassa tehty kuitenkin jo useita siltojen suunnitelmia ja niistä on toteutettu yksi jo vuonna 1997 Akerhusissa. Siellä sillan palkkeihin asennettiin mittalaitteet palkkien muodonmuutosten seurantaan varten. Tämä koesilta on esitelty tarkemmin kohdassa 4. Saatujen hyvien kokemusten perusteella useita siltoja käyttäen ei-metallisia tankoja ja punoksia, on tulossa toteutukseen Norjassa.

USA

USA:ssa ovat yliopistot ja ACI (American Concrete Institut) laatineet ohjeita / 1, 2, 20 / ei-metallisten FRP-tuotteiden käyttöä varten. ACI:n ohjeet lähteessä / 1 / eivät koske jännitettyjä betonirakenteita. ACI:n ohjeen / 1 / pääsisältö on seuraava:

1. Taustainformaatio
2. FRP-tankojen materiaalit
3. Suositeltavat materiaalit, vaatimukset ja rakentaminen
4. Suunnitteluohjeet
 - Yleiset suunnittelun perusteet
 - Taivutus
 - Leikkaus
 - Lämpötilat ja kutistumisraudoitus
 - Tankojen jatkaminen
 - Maanvaraiset laatat
 - Referenssejä (standardit ja kirjallisuus)
5. Suunnitteluesimerkkejä

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

6. Testimenetelmiä

7. Jatkotutkimuksen alueet.

ACI on julkaissut ohjeita myös FRP-punosten käytöstä jännitetyissä betonirakenteissa / 2 /.

ACI järjestää em. ohjeiden perusteella laadittuja oppikursseja ei-metallisten FRP-tuotteiden käytöstä eri sovelluksissa. Näiden kurssien ja ohjeiden / 1, 2 / avulla on USA:ssa tehty jo lukuisia rakennuksia ja siltoja.

EU

Ensimmäinen yhteiseurooppalainen kehityshanke ei-metallisten FRP-tuotteiden osalta toteutettiin BRITE/EURAM –projektina vuosina 1991 – 1996.

EU:ssa oli vuosina 1993 – 1997 yhteishanke Eurocrete (mukana edustajat Englannista, Hollannista, Sveitsistä, Ranskasta ja Norjasta), jossa edistettiin merkittävästi ei-metallisten FRP-tuotteiden ohjeistusta Euroopassa. Tätä työtä ovat jatkaneet ”ConFibreCrete Network”-hanke, jossa on mukana 11 tutkimuslaitosta yhdeksästä eurooppalaisesta maasta (ei Suomesta). Tämä hanke tukee myös fib:n (International Federation for Structural Concrete) työryhmän 9.3 (60 jäsentä eri teollisuusmaista, useimmat eurooppalaiset maat mukana, Suomi ei) suunnitteluohjeiden tekoa. Työryhmä 9.3 tekee suunnitteluohjeita ei-metallisten FRP-tuotteiden käyttöä varten, ensin käyttö teräsbetonirakenteissa. Se on saanut jo valmiiksi ohjeita betonirakenteiden vahvistamiseen ei-metallisilla nauhoilla ja ohjeita muiden sovellusten osalta tehdään parhaillaan.

Englanti

Englannissa on laadittu tutkimuslaitoksissa ohjeet ei-metallisten FRP-tuotteiden käytöstä / 8, 9,10 /. Standardi-tasolle ei ole vielä edetty, mutta englantilaiset ovat aktiivisesti mukana tämän alueen eurooppalaisessa ja muussakin kansainvälisessä yhteistyössä. Englantilaisten ohjeiden avulla Englannissa rakennettu jo useita siltoja käyttäen ei-metallisia tankoja tai punoksia. Näitä siltoja on esitelty tarkemmin kohdassa 4. Englantilaiset ovat laatineet ohjeet ei-metallisten FRP-tuotteiden käytöstä silloissa / 10 /. Näissä ohjeissa on käsitelty erilaisia FRP:n sovellusmahdollisuuksia betonisilloissa. Tässä sen pääsisältö:

1. Johdanto komposiitteihin
2. Betonin sisäinen lujittaminen
3. Jännepunos
4. Sillan kannatinkaapelit (vinoköydet)
5. Muottityö
6. Palkkien ja laattojen vahvistaminen
7. Pilarien vahvistaminen
8. Vahvistaminen lisäjännekaapelien avulla
9. Verhousjärjestelmät
10. Muut FRP:n sovellukset.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

Japani

Ensimmäiset ohjeet maailmassa FRP-tankoja ja -punoksia varten julkaistiin Japanissa jo vuonna 1993. Siltoja varten on kehitetty omat sovellusohjeensa (valmistunut 1996). Japanilaisten mitoitusmenetelmät poikkeavat kuitenkin melkoisesti länsimaisista menetelmistä, ja niitä ei sen vuoksi ole voitu tehokkaasti hyödyntää. Tämä kehitystyö tuotti japanilaisille useita kaupallisia FRP-järjestelmiä.

Suomi

Suomessa on laadittu ohjeet betonirakenteiden vahvistamisesta liimattavien ei-metallisten nauhojen avulla, mutta ei-metallisten tuotteiden käytöstä tavanomaisen tai jänneraudoituksen asemasta ei ole ohjeita tai standardeja. Asian edistämiseksi Suomessa suomalaisilla on mahdollisuus mennä mukaan edellä esitettyyn eurooppalaiseen ja kansainväliseen ohjeiden ja standardien laadintatyöhön tai soveltaa jo laadittuja ohjeita ja standardeja. Kanadalaisten standardit ovat tällä hetkellä parhaat esimerkit.

14 ESIMERKKISILTA

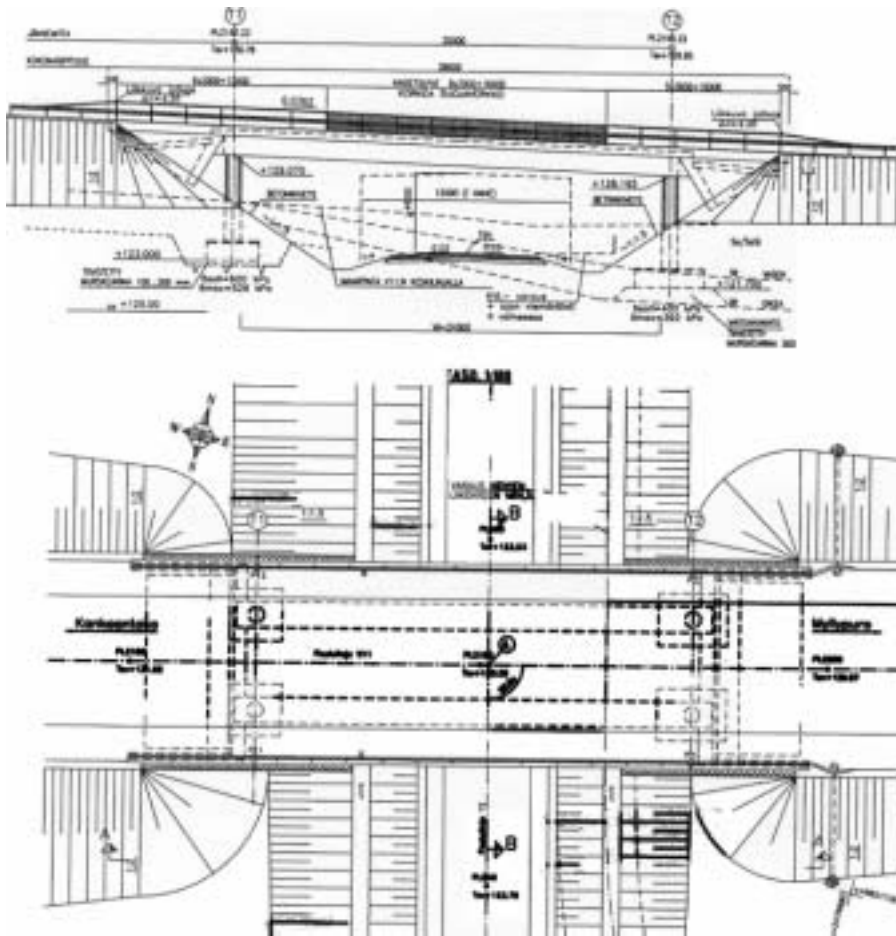
14.1 Ei-metallisten tankojen ja punoksien käyttömahdollisuudet esimerkkisillassa

Ei-metallisia tankoja punoksia voidaan käyttää silloissa korvaamaan perinteellinen rauditus joko koko sillassa tai vain korroosion kannalta kriittisimmässä osissa kuten reunapalkeissa. Tähän tarkasteluun valittiin esimerkkisillaksi Tampereen läntiselle kehätielle vuonna 2004 rakennettu Leppäkorven risteyssilta, kuvat 20 ja 21. Esimerkkisillan yksi raudituspiirustus (kannen raudituspiirustus) on esitetty liitteessä 1.

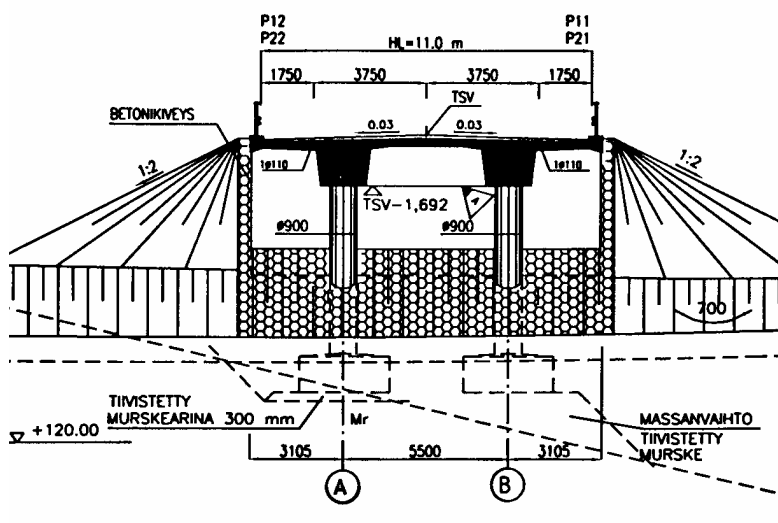
Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552



Kuva 20. Leppäkorven risteyssilta, pitkittäisleikkaus ja tasokuva.



Kuva 21. Leppäkorven risteyssilta, poikittäisleikkaus.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

Materiaalikustannuksiltaan eivät ei-metalliset tangot ja punokset ole kilpailukykyisiä perinteellisen teräsraudoitteen kanssa. Seuraavassa kohdassa on tehty laskelmat siitä tilanteesta, kun mukaan otetaan kustannukset rakenteen suunnittelukäyttöään mukaisen elinkaaren osalta.

14.2 Esimerkkisillan elinkaarikustannukset

Esimerkkisillan elinkaarikustannuslaskelmat perustuvat lähteessä / 35 / esitetyn menetelmän soveltamiseen ja sieltä on saatu myös osa lähtöarvoista. Laskelmissa on tarkasteltu myös sellaista teoreettista vaihtoehtoa, että käytettäessä ei-metallisia tankoja, jätetään vedeneristeet pois siltalaatasta.

Esimerkkisillan suunnittelukäyttöään mukaisissa elinkaarikustannuslaskelmissa on lähtötietoina käytetty seuraavia lukuarvoja:

- Liikennemäärä: 5000 ajoneuvoa/vrk
- Suunnittelukäyttöikä: 100 vuotta
- Diskonttauskorko: 5 %.

Kustannusten nykyarvon laskennassa on käytetty kaavaa

$$P = \sum_{t=1}^{100} k_t / (1 + i)^t$$

jossa P on kustannusten nykyarvo

k_t on vuoden t aikana kertyvät kustannukset

i on diskonttauskorko.

Esimerkkisillan elinkaarikustannuslaskelmiin on otettu mukaan vain ne tekijät, joissa syntyy ko. vertailussa oleellista eroa. Tällöin tulokset esittävät elinkaarikustannusten eroa ja eri vaihtoehtojen keskinäisen paremmuusjärjestyksen ja niiden erojen suuruudet. Esimerkkisillan hintatiedot ja peruskorjauskustannusten kustannusarviot on saatu Finmap Consulting Oy:n siltasuunnittelusta ja ylläpitokustannusarvio Tiehallinnon asiantuntijalta Yrjö Kumpulalta. Esimerkkisillan rakentamiskustannusten hinta-arvio oli 248 000 € (ALV 22 %).

Taulukoissa 4 - 7 on esitetty seuraavat tarkastelut:

- Vertailu reunapalkkien osalta. Vertailussa mukana myös ruostumaton teräs.
- Vertailu jännepunosten korvaamisen osalta.
- Vertailu koko sillan osalta, kun ”pehmeät” teräkset korvataan. Vedeneriste mukana.
- Vertailu koko sillan osalta, kun ”pehmeät” teräkset korvataan. Vedeneriste jätetään pois ei-metalliset tankoja käytettäessä.

Taulukoiden 4 – 7 laskelmissa oli oletuksena, että käytettäessä ei-metallisia tankoja ylläpito- ja peruskorjauskustannukset pienenevät oleellisesti verrattuna siihen, kun käytetään terästankoja. Laskelmissa ALV on 0 %. Lujuuslaskelmissa käytettiin lasikuitutangon vetolujuutena 1,5 x terästangon vetolujuus ja hiilikuitutangolla 2,5 x terästangon vetolujuus.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

Taulukko 4. Vertailu reunapalkkien osalta.

Toteutuskustannukset					Elinkaarikustannusten nykyarvot			
Rakentamismenetelmä	Korjaustyön kesto-aika, viikkoa	Materiaalikustannukset, €	Ylläpitokustannukset, €/v	Peruskorjauskustannukset, €	Materiaalikustannukset, €	Ylläpitokustannukset, €	Peruskor. tai purkamis- ja uusimisk., €	Elinkaarikust. nykyarvo yhteensä, €
Terästanko	3	570	500	76 8600	570	10 070	5 490	16 130
Lasikuitutanko	1	730	250	1 000	730	5 035	90	5 855
Hiilikuitutanko	1	3 390	250	1 000	3 390	5 035	90	8 515
Ruostumaton terästanko	1	5 630	250	1 000	5 630	5 035	90	10 755

Laskelman perusteella reunapalkit lasikuitutangoilla ovat elinkaarikustannuksiltaan (!vain toisistaan poikkeavat kustannukset mukana) edullisimmat. Toiseksi paras vaihtoehto on hiilikuitutangot (+45 %) ja perinteellinen rauditus jää huonoimmaksi (+175 %). Ruostumaton terästanko on reunapalkissa kolmanneksi paras vaihtoehto (+84 %).

Taulukko 5. Vertailu jännepunosten korvaamisen osalta.

Toteutuskust.		Elinkaarikustannusten nykyarvot	
Rakentamismenetelmä	Materiaalikustannukset, €	Materiaalikustannukset, €	Elinkaarikustannusten nykyarvo yhteensä, €
Teräspunos	4 860	4 860	4 860
Lasikuitupunos	5 400	5 400	5 400
Hiilikuitupunos	17 210	17 210	17 210

Jännepunosten osalta edullisin menetelmä on perinteellinen teräspunos, lasikuitu on toisena (+12 %) ja hiilikuitu kolmantena (+254 %). Oletuksena oli, että tässä tapauksessa ylläpito- ja korjauskustannuksissa ei ole merkittävää eroa eri vaihtoehdoilla.

Taulukko 6. Vertailu koko sillan osalta, kun ”pehmeät” teräkset korvataan Vedeneriste mukana.

Toteutuskustannukset					Elinkaarikustannusten nykyarvot				
Rak. menetelmä	Perusk. työn kesto, viikkoa	Mater. kust., €	Ylläpito-kust., €/v	Peruskor. kust., €	Mater. kust., €	Ylläpito-kust., €	Peruskor. kust., €	Liikenne-haittakus. perusk. yhteydessä, €	Elink. kust. nykyarvo yhteensä, €
Teräs	10	41 220	5 000	255 590	41 220	100 700	22 290	21 280	185 490
Lasikuitu	3	53 590	500	896 700	53 590	10 070	78 190	1 060	142 910
Hiilikuitu	3	247 340	500	896 700	247 340	10 070	78 190	1 060	336 660

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

Kun koko sillan osalta korvataan ”pehmeät” raudoitteet ei-metallisilla tangoilla ja vedeneriste on sillan kannessa perinteellisesti mukana, on elinkaarikustannuksiltaan edullisin materiaali lasikuitutanko, teräs on toiseksi edullisin (+30 %) ja hiilikuitutanko jää kolmanneksi (+135 %).

Taulukko 7. Vertailu koko sillan osalta, kun ”pehmeät” teräkset korvataan ja vedeneriste jätetään pois käytettäessä ei-metallisia tankoja.

Toteutuskustannukset

Elinkaarikustannusten nykyarvot

Rak. menetelmä	Perusk. työn kesto, viikkoa	Mater. kust., €	Ylläpito-kust. €/v	Perusk. kust., €	Mater. kust., €	Ylläpito-kust., €	Peruskorjauskust., €	Liikennehaittak., €	Elink. kust. nykyarvo yhteensä, €
Teräs	10	49 417	5 000	255 590	49 417	100 700	22 290	21 280	193 687
Lasikuitu	3	53 590	500	94 550	53 590	10 070	8 250	1 060	72 970
Hiilikuitu	3	247 340	500	94 550	247 340	10 070	8 250	1 060	266 720

Kun koko sillan osalta korvataan ”pehmeät” teräkset ei-metallisilla tangoilla ja vedeneriste jätetään pois käytettäessä ei-metallisia tankoja, on elinkaarikustannuksiltaan edullisin materiaali lasikuitutanko, toisena on teräs (+165 %) ja kolmantena hiilikuitutanko (+265 %).

15 JATKOTUTKIMUSSUUNNITELMA

Tämän esitutkimuksen perusteella on seuraavassa esitetty ehdotus ei-metallisten tankojen ja punosten siltasovellusten jatkotutkimuksesta. Tähän aiheeseen on kansainvälistäkin kiinnostusta, joten se on mahdollista ainakin osittain yhdistää esimerkiksi EU-hankkeeseen.

Johdanto

Ei-metalliset tangot ovat osoittautuneet kilpailukykyisiksi betonirakenteissa ja erityisesti silloissa, joissa niiden huonot palonkesto-ominaisuudet eivät yleensä tuota ongelmia. Ne ovat vielä materiaalikustannuksiltaan kalliimpia kuin perinteellinen rauditus, mutta niiden ominaisuudet kuten suuri vetolujuus ja hyvä korroosionkestävyys ja siten saavutettavat rakenteiden ylläpito- ja korjauskustannuksissa saavutettavat säästöt tekevät niistä elinkaarikustannuksiltaan edullisia. Näin on erityisesti lasikuitutankojen osalta. Hiilikuitutangot eivät ole vielä yhtä edullisia.

Tavoitteet

Tavoitteena on ei-metallisten tankojen käyttövalmius silloissa sekä ko. rakenteiden suunnittelu- ja valmistusohjeet.

Tehtävät

Tavoitteena olevan ei-metallisten tankojen käyttövalmiuden hankkiminen siltasovelluksille käsittää teoreettisen osan ja koesillan rakentamisen.

Projektin tehtäviä ovat:

1. Ei-metallisten tankojen suolapakkaskestävyyden varmistaminen kokeilla.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

2. Suunnitteluohjeiden laadinta ulkomaisten ohjeiden avulla ja yhteistyössä käynnissä olevien eurooppalaisten tutkimusprojektien kanssa. Samalla selvitetään nykyistä tarkemmin ko. rakenteen haurasmurtumiseen liittyvät riskit ja niiden eliminoiminen suunnittelussa (varmuustarkastelu).
3. Valmistusohjeiden laadinta.
4. Laadunvarmistusohjeen laadinta.
5. Tutkitaan vedeneristeen poisjättämisen mahdollisuudet erilaisissa silloissa.
6. Selvitys ko. tankojen saatavuudesta ja valmistusmahdollisuuksista Suomessa.
7. Koesillan suunnittelu, toteutus ja seurantatutkimus. Vaihe 1: lasikuitutankojen käyttö reunapalkeissa.

Aikataulu

Tutkimus voidaan aloittaa välittömästi ja se kestää noin kaksi vuotta. Koesillan seuranta jatkuu senkin jälkeen ja päätökset sen kestosta tehdään vuosittain.

16

YHTEENVETO

Tässä esitutkimuksessa tarkasteltiin ei-metallisia tankoja ja punoksia ja mahdollisuuksia korvata niillä siltojen perinteelliset raudoitukset. Ulkomailla, kuten Kanadassa, USA:ssa ja Japanissa, nämä tuotteet ovat silloissa ja eräissä muissakin rakenteissa jo käytössä. Euroopassa on rakennettu muutamia koesiltoja ja muitakin koerakenteita. Suomessa näiden tuotteiden käytön tutkimus on ollut vielä vähäistä. Siltojen vahvistamiseen on Suomessakin jo käytetty ei-metallisia hiilikuitunauhoja ja epoksiliimausta.

Ei-metallisten tankojen ja punosten käyttö silloissa perustuu niiden erikoisominaisuuksiin kuten hyvään korroosionkestävyyteen, vetolujuuteen (hiilikuidulla suunnitelluvetolujuus 1,6 GPa) ja keveyteen. Toisaalta ei-metallisten tankojen ja punosten huono palonkestävyys, korkea hinta ja valmistustekniikan erikoisuudet sekä vielä osittain epäselvä suolapakkaskestävyys rajoittavat niiden käyttöä.

Korkeita materiaalikustannuksia korvaavat mm. hyvän korroosionkeston ansiosta alhaiset ylläpito- ja korjauskustannukset, rakenteen pienemmät dimensiot ja keventynyt paino. Näin ei-metallisten tuotteiden käyttö perinteellisen raudoitteen korvaajana voi olla taloudellisesti edullista. Sillan rakentamiskustannusten osalta ei-metalliset tangot ja punokset eivät ole vielä kilpailukykyisiä, mutta kun laskelmiin otetaan mukaan rakenteen suunnittelukäyttöään mukaisen elinkaaren kustannukset niin tilanne on toinen.

Elinkaarikustannuslaskelmilla todettiin, että keskikokoisessa maantiesillassa ei-metallisten tankojen (lasikuitu- ja hiilikuitutangot) käyttö on edullista sillan reunapalkeissa. Ruostumattoman terästangon käyttöä tarkasteltiin myös elinkaarikustannuslaskelmalla sillan reunapalkeissa ja se osoittautui paremmaksi kuin teräs, mutta huonommaksi kuin lasi- ja hiilikuitutangot. Lasikuitutangot ovat edullisia myös koko sillassa. Jännepunoksia ei vielä kannata korvata ei-metallisilla tuotteilla.

Jatkotutkimuksissa on tarpeen ensin selvittää ei-metallisten tankojen suolapakkaskestävyys suomalaisissa olosuhteissa. Sillan, jossa käytetään ei-metallisia tankoja, suunnittelua ja toteutusta varten on laadittava ohjeet. Ei-metallisten tankojen valmistusta Suomessa tulee edistää ja ennen laajamittaista ei-metallisten tankojen käyttöönottoa

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

Suomessa on syytä rakentaa koesilta käyttäen ko. tuotteita. Jatkotutkimuksia varten on tässä esitutkimuksessa laadittu jatkotutkimussuunnitelma.

LÄHDELUETTELO

1. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforcement with FRP Bars. American Concrete Institut 2003. USA. ACI-440.IR-01.
2. Guidelines for Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons. American Concrete Institut, USA. ACI 440I, 2001.
3. Design and Construction of Building Components with Fibre-reinforced Polymers. Kanada 2002. CAN/CSA-S806-02 (standardi).
4. Reinforcing concrete structures with reinforced polymers (FRPs). Manual No 3. ISIS Canada design manuals. Kanada 2001.
5. Prestressing concrete structures with FRPs. Manual No 5. ISIS Canada design manuals. Kanada 2001.
6. Eurocode modifications to NS3473 when using FRP reinforcement. STF (SINTEF) 22 A98741 raport. Norja 1998.
7. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforced materials. JSCE (Japan society of civil engineers), Concrete engineering series 23, ed. by A. Machida. Japani 1997, 325 s.
8. Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. Technical Report 55, TR55, Concrete society, Englanti 2000, 72 s.
9. Strengthening concrete structures with fibre composite materials – acceptance, inspection and monitoring. Technical Report 57, TR57, Concrete society, Englanti 2003, 48 s.
10. Use of fibre composites in concrete bridges, CBDG/010 (Concrete Bridge Development Group), Englanti 2001, 36 s.
11. Stone, D., Tumialan, G., Nanni, A., and Paretti, R. Near-surface mounted FRP reinforcement: application of an emerging technology. Concrete Vol. 36, No 5, May 2002, s. 42 – 44.
12. Farmer, N. Near-surface mounted carbon fibre reinforcement. Concrete Vol 37, No 1, January 2003, s. 20 – 21.
13. Ibell, T. An Anglo-American perspective on fibre-reinforced polymers for concrete construction. Concrete Vol. 37, No 6, June 2003, s. 27 – 28.
14. Hole, A., Nerum, K. Non-metallic reinforcement: recent projects from Norway. Concrete Vol 37, No 6, June 2003, s. 29 – 32.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

15. Cadei, J. The Nesscliffe bypass Wilcott footbridge – a triumph of FRP. Concrete Vol 37, No 6, June 2003, s. 37.
16. Tann, D., Delpak, R. Research into FRP strengthening of concrete structures. Concrete Vol 37, No 6, June 2003, s. 35 – 36.
17. Ei-metallisten raudoitteiden valmistajien, myyjien ja urakoitsijoiden www-osoitteita:
www.fiberglassrebar.com
www.fibreforce.co.uk
www.saint-gobainvetrotex.com
www.weldgrip.com
www.sika.com
www.sika.fi
www.pultrall.com
www.tillco.com
www.kolumbus.fi/liimakon
18. Alampalli, S., O'connor, J., Yannotti, A. Design, Fabrication, Construction and Testing of an FRP Superstructure. Transportation research and development bureau, New York state department of transportation, Special report 134, USA 2000, 51 s.
19. Fibre-reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (in 2 Volumes). Proceedings of the sixth international symposium on FRP reinforcement for concrete structures (FRPRCS-6). Singapore 8 – 10 July 2003, ed. By Tan, K.
20. Concrete Reinforced with FRP Bars. Design & Construction Guide, USA 2001, 41 s.
21. Dolan, C., Bakis, C., Nanni, A., Design Recommendations for Concrete Structures Prestressed with FRP Tendons. USA 2001, 113 s.
22. Tirkkonen, T., Betonirakenteiden liimavahvistukset. Betonipäivät 2003. S. 85 – 95.
23. Betonipalkkien vahventaminen Carbodur-hiilikuitulevyillä. Sika-menetelmät ulkobetonirakenteille ja teollisuuteen 2002. S. 64.
24. SIKI Carbodur. Vahventamismenetelmä. VTT-sertifikaatti nro 164/01. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka 2001.
25. Honkaranta, M., Tirkkonen, T., Palkkisiltojen vahventamismenetelmät. Kirjallisuustutkimus. VTT:n Tiedotteita 1647, 1995, 80 s.
26. Tirkkonen, T., Betonisiltojen vahventaminen liimaamalla. Liimaustekniikka rakenteiden kokoonpanossa. Innoweld 2000, Insko-seminaari 15. – 16.3.2000. Ammattienedistämislaitos AELI; INSKO, Helsinki 2000.
27. Tirkkonen, T., Betonisiltojen vahventaminen hiilikuiduilla. Loppuraportti. Tielaitoksen selvityksiä 33/1999. 92 s. + liitt. 16 s.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

28. Tirkkonen, T., Tiehallinnon betonirakenteiden liimausvahventamisohje. RIL K 189-2001. Siltapäivät 2001. Helsinki 17. – 18.5.2001, s. 69 – 78.
29. Teng, J. FRP-strengthened RC structures. Väitöskirja, HTKK 2002, 245 s.
30. Karbhari, M. Use of Composite Materials in Civil Infrastructure in Japan. International Technology Research Institute. World Technology Division, 1998.
31. Rizkalla, S., Nanni, A. (editors), Field Applications of Reinforcement: Case Studies. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2003, ACI SP-215, 434 pp.
32. Chung, N., Fibre reinforced polymer (FRP) composites, <http://gnatchung.tripod.com/FRP/>.
33. Wu, Z., He, W., Strengthening performance of FRP sheets in concrete tunnel linings. Concrete Vol. 37, No 6, June 2003, s. 33 – 34.
34. Terrasi, G., CFK-vorgespannte Tragwerkelemente aus Hochleistungsbeton, Beton Werk International, 5/2004. Saksa. 10 s.
35. Rautakorpi, H., Pienten siltojen elinkaarikustannukset. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 4/2004. 40 s.
36. FRP decks and superstructures: current practice. U.S department of transportation. Federal highway administration. Bridge technology/2004. www.fhwa.dot.gov/bridge/frp.
37. Cusson, R., Xi, Y., The behaviour of fiber-reinforcement polymer reinforcement in low temperature environmental climates. USA, University of Colorado, v. 2002. Report No. CDOT-DTD-R-2003-4, 97 s.
38. Betonirakenteiden liimausvahventamisohjeet. Tiehallinto 2005.
39. Matala, S., Räsänen, O., Siltojen kuorirakenteiset reunapalkit. Tiennäyttäjä 2/2005.
40. Siltojen reunapalkkien kuoret. Tiehallinto 2005, TIEH 2000016-v-05.

LIITE 1. Esimerkkisillan kannen raudoituspiirustus.

Juha Ratvio

21.4.2005

A-5552

ESIMERKKISILLAN KANNEN RAUDOITUSPIIRUSTUS

