

Krister Majander

Betoniterästen korvaaminen komposiittitangoilla siltarakenteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Rakennusinsinööri (AMK)

Rakennustekniikka,

Infrarakentaminen

Insinöörityö

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Krister Majander Betoniterästen korvaaminen komposiittitangoilla siltarakenteissa 56 sivua 14.4.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Infrarakentaminen
Ohjaaja(t)	Kehittämispäällikkö Markku Savola Lehtori Mika Räsänen
<p>Tässä insinööriyössä tarkasteltiin FRP-tuotteiden ominaisuuksia ja mahdollisuuksia korvata siltojen perinteiset raudoitteet FRP-tangoilla. FRP-tuotteet kuten tangot ja punokset ovat kuiduista, hartsista ja lisäaineista valmistettuja komposiitteja. Näitä tuotteita on jo käytetty silloissa ja muissakin rakenteissa ulkomailla, kuten Kanadassa, USA:ssa, Japanissa ja Euroopassa. Suomessa FRP-tuotteiden käyttö ja tutkimus on ollut vähäistä. FRP-tuotteita on Suomessa käytetty vain jo olemassa olevien betonirakenteiden vahvistamiseen liimamalla hiilikuitukangasta ja -nauhoja epoksiliimalla betonirakenteisiin.</p> <p>FRP-tuotteiden erikoisominaisuuksia ovat hyvä korroosionkestävyys eli ruostumattomuus, suuri vetolujuus sekä keveys. Niiden käyttö siltarakenteissa perustuu edellä mainittuihin erikoisominaisuuksiin. FRP-tuotteiden huonoja ominaisuuksia ovat pieni murtovenymä, huono palonkestävyys, korkea hinta, arkuus UV-valolle sekä osittain epäselvä pitkäaikaiskestävyys suomalaisissa olosuhteissa. FRP-tankojen käyttöä rajoittaa myös se, että niitä ei voida taivuttaa työmaalla. Suurin osa FRP-tuotteiden huonoista ominaisuuksista voidaan ratkaista asianmukaisella suunnittelulla.</p> <p>FRP-tuotteiden korkeita materiaalikustannuksia kompensoivat niiden hyvät ominaisuudet. Rakenteiden ylläpito- ja korjauskustannukset ovat huomattavasti pienempiä käytettäessä FRP-tankoja terästankojen sijaan. Korjauskulut ovat pienempiä tankojen ruostumattomuuden ansiosta. Myös rakenteen dimensiot ja paino pienenevät. Suomessa tehtyjen elinkaarikustannuslaskelmien mukaan FRP-tangoista lasikuitutangot ovat edullisin vaihtoehto korvaamaan terästangot keskisuuren maantiesillan reunapalkeissa sekä myös koko sillassa.</p>	
Avainsanat	FRP, FRP-tanko, Komposiittitanko, Siltarakenne, Lasikuitutanko, Hiilikuitutanko, Raudoite

Author Title	Krister Majander Replacing steel reinforcement with composite bars in bridge structures
Number of Pages Date	56 pages 14 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Infrastructural Engineering
Instructor(s)	Development Manager Markku Savola Lecturer Mika Räsänen
<p>This thesis studies the properties of FRP products and the possibility of replacing steel reinforcement in bridges with FRP bars. FRP products such as FRP bars and braids are composites which are made of fibers, matrix material and additives. These products have already been used in bridges and in other constructions abroad for example in Canada, USA, Japan and Europe. In Finland research and use of FRP products has still been limited. In Finland FRP products have only been used in strengthening existing structures with FRP and epoxy.</p> <p>Special properties of FRP-products are good corrosion resistance properties and tensile strength as well as light weight. The use of FRP products in bridge construction is based on these special properties. Problematic aspects of FRP products are small elongation at break, poor fire resistance properties, high material cost, sensitivity to UV-radiation and poorly known long-term durability in Finnish conditions. The use of FRP bars is also limited by the bending properties of FRP bars. FRP-bars cannot be bent on site. Most of the problems related to using FRP products can however be solved with appropriate planning.</p> <p>The high material costs of FRP products are compensated by the good properties of FRP products. Maintenance and repair costs in constructions are considerably lower when using FRP bars instead of steel reinforcement. This is because FRP bars are corrosion resistant. Also the dimensions and weight of structures are smaller when FRP bars are used. Life cycle costs calculated in Finland show that it is economical to use FRP bars instead of steel bars in a middle sized road bridge.</p>	
Keywords	FRP, Fiber Reinforced Polymers, Composite bar, Bridge structure, Glass fiber bar, Carbon fiber bar, Reinforcement

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta ja tavoitteet	1
1.2	Työn rajaus	2
1.3	Tutkimusmenetelmä	3
1.4	Opinnäytetyön tilaaja	3
2	FRP-tuotteet	4
2.1	Komponentit	5
2.2	Kuidut	5
2.2.1	Lasikuitu	7
2.2.2	Hiilikuitu	9
2.2.3	Aramidikuitu	10
2.2.4	Basalttikuitu	11
2.3	Hartsit	12
2.3.1	Epoksihartsi	13
2.3.2	Vinyyliesterihartsi	14
2.4	Lisäaineet	14
3	FRP-tankojen ominaisuudet	15
3.1	Tiheys	16
3.2	Lujuus	16
3.3	Murtovenymä	17
3.4	Kestävyys	20
4	FRP-tankojen käsittely ja varastointi	27
4.1	Käsittelyssä huomioitavaa	27
4.2	Asentamisessa huomioitavaa	29
4.3	FRP-tankojen taivuttaminen	30
5	FRP-tankojen käyttö ulkomailla	32
5.1	Infrarakentamisen esimerkkejä	32
5.2	Talonrakentamisen esimerkkejä	34

5.3	Siltarakentamisen esimerkkejä	35
6	Käyttökohteet siltarakentamisessa	41
6.1	Uudisrakentaminen	41
6.2	Korjausrakentaminen	42
6.3	Käyttö betonirakenteen vahventamisessa	42
7	FRP-tankojen käytön taloudellisuus	45
8	Pohdintaa	50
9	Yhteenveto	52
	Lähteet	55

Lyhenteet

FRP *Fiber Reinforced Polymer*. Kuitulujitteinen polymeeri. FRP on valmistettu kuiduista ja hartsista. Kuitulujitteisia polymeerejä kutsutaan yleensä FRP-materiaaleiksi, ei-metallisiksi materiaaleiksi, komposiittimateriaaleiksi tai lujitemuoveiksi. FRP-tuotteissa käytetyt kuidut ovat yleensä lasikuitua, hiilikuitua tai aramidikuitua.

FRP-raudoitus

FRP-raudoitus on kuitulujitteisista polymeereistä valmistetuista tangoista koostuva raudoitus. FRP-raudoitus valmistetaan samalla tavalla kuin perinteinen teräsraudoitus ja se myös muistuttaa ulkonäöltään perinteistä raudoitusta.

PAN Polyakrylonitriili. Hiilikuidun raaka-aine.

1 Johdanto

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Uusia ratkaisuja rakentamisen kustannustehokkuuden parantamiseksi kehitetään jatkuvasti. Siltarakentamisessa kustannustehokkuutta pyritään parantamaan muun muassa pidentämällä siltojen suunniteltua käyttöikää. Siltojen tulisi kestää ankarissa olosuhteissa useita kymmeniä vuosia ilman peruskorjausta. Ulkomailla on kehitelty ja käytetty erilaisia betoniteräksiä korvaavia materiaaleja, joilla pystytään pidentämään siltojen suunniteltua käyttöikää. Tällaisia korvaavia materiaaleja ovat muun muassa kuitulujitteisista polymeereistä (FRP = *Fiber Reinforced Polymers*) valmistetut tuotteet. FRP:stä valmistetut tangot ja punokset sopivat ulkomaisten tutkimusten mukaan ominaisuuksiensa puolesta käytettäväksi terästen korvaajina betonirakenteissa. FRP-tuotteiden käyttöön liittyy kuitenkin myös ongelmakohtia, joita käsitellään tässä insinööriyössä.

Siltarakentamisessa käytetään paljon teräsbetonia, joka koostuu betonimassasta sekä teräsraudoitteista. Betonilla on hyvä puristuslujuus, mutta hyvin pieni vetolujuus verrattuna puristuslujuuteen. Betonin vetolujuutta parannetaan teräsraudoitteilla. Raudoitteet asetetaan betonivalun sisään, jolloin raudoitteista ja betonimassasta saadaan yhtenäinen luja rakenne. (1, s. 1.) Emäksisessä betonimassassa teräksen pinnalle muodostuu korroosiolta suojaava oksidikalvo. Betoni antaa teräsraudoituksille myös fysikaalisen suojan, joka estää korroosiota edistävien aineiden eli veden ja hapen pääsyn kosketukseen terästen kanssa. (2, s. 97.)

Terästangot ovat yleisimpiä betonirakenteissa käytettyjä raudoitteita, koska ne soveltuvat hyvin ominaisuuksiltaan raudoitteiksi sekä ovat kustannuksiltaan edullisia. Terästankojen kanssa tulee ongelmia, jos betonirakenteeseen kohdistuu kloridirasitusta esimerkiksi suolauksesta tai merivedestä (1, s. 1). Suola ja vesi tunkeutuvat hiljalleen betonin sisälle ja rapauttavat raudoitusta suojaavan oksidikalvon (2, s. 98). Ilman erikoistoimenpiteitä kloridirasitus johtaa teräsraudoitteiden korroosioon sekä rakenteen vaurioitumiseen ja heikkenemiseen. Ruostuminen paisuttaa terästankoa johtaen betonin halkeiluun. Tällöin terästankoihin kohdistuva kloridirasitus kasvaa entisestään. Vesi ja suola kulkeutuvat syntyneiden halkeamien kautta esteettä betonin sisälle ja ruostuttavat terästankoja nopeasti. (1, s. 1.)

Ruostumisesta aiheutuvat ongelmat voidaan välttää käyttämällä sellaisia raudotteita, jotka eivät ruostu. Tällaisia materiaaleja ovat epoksinnoitetut teräkset, ruostumattomat teräkset sekä FRP-tangot ja -punokset. Epoksinnoitettujen tankojen ongelmana on melko korkea hinta sekä käsittelyn yhteydessä pinnoitteen rikkoutumisvaara. Ruostumattoman teräksen hyvä puoli on parempi korroosionkesto kuin tavallisella teräksellä, mutta ruostumaton teräs on yleensä liian kallista. FRP-tangot eivät ruostu ja niiden hinta on kilpailukykyinen huomioitaessa rakenteen koko elinkaari. FRP-tankojen käyttöönoton tavoitteena on siltojen käyttöiän sekä peruskorjausvälin pidentäminen. (1, s. 1.)

FRP-tuotteissa käytetyt materiaalit kehitettiin alun perin ilmailu-, avaruus- sekä puolustusteollisuutta varten, mutta materiaaleilla on suuri käyttöpotentiaali myös infra-alalla. FRP-tuotteita on käytetty ulkomailla siltarakentamisessa 1980-luvun alusta asti. (3, s. 2.) Suomessa näitä tuotteita on käytetty vain jo olemassa olevien rakenteiden vahvistamiseen, johon on olemassa suomalainen suunnitteluohje. Suunnitteluohjeessa käsitellään vain jo olemassa olevien rakenteiden vahvistamista. (1, s. 1).

Opinnäytetyön tavoitteena on kartoittaa FRP-tuotteiden nykytilanne ulkomailla sekä Suomessa ja kerätä tietoa FRP-tuotteista jatkoprojekteja ja -tutkimuksia varten. Jatkoprojektien kannalta ongelmallista on FRP-tankojen eli komposiittitankojen suomalaisten suunnitteluohjeiden puuttuminen. FRP-tuotteita voitaisiin tulevaisuudessa käyttää sekä uudisrakentamisessa, että korjausrakentamisessa. Tässä insinööriyössä on haettu vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

- Soveltuvatko FRP-tangot ominaisuuksiensa puolesta käytettäviksi siltarakentamisessa ja esimerkiksi siltojen reunapalkeissa tai pilareissa?
- Mitä hyötyjä saavutettaisiin jos betoniteräkset korvattaisiin FRP-tangoilla ja mitä haittoja ja rajoitteita se aiheuttaisi?

1.2 Työn rajaus

Siltojen suunniteltua käyttöikää ja peruskorjausväliä pystytään pidentämään eri keinoin. Tässä insinööriyössä tutkitaan sillan käyttöiän sekä korjausvälin pidentämistä FRP-

tuotteilla eli kuiduista ja hartsista valmistetuilla komposiittitangoilla ja punoksilla. FRP-tuotteita voidaan käyttää sillan eri osissa perinteisten raudotteiden korvaajina, mutta on selvítettävä, missä sillan osissa FRP-tankojen käyttäminen on niiden ominaisuuksien kannalta järkevää ja kustannustehokasta. Kustannuksia arvioitaessa otetaan huomioon sillan koko elinkaari. Syntyvät kustannukset määräytyvät pääasiassa sillan suunnitteluvaiheessa, jolloin päätetään siltatyyppi sekä käytettävät materiaalit.

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tarkastella FRP-tankojen käyttämistä siltarakentamisessa. Ennen FRP-tankojen käyttöönottoa on selvítettävä niiden ominaisuudet. Selvítettäviä ominaisuuksia ovat muun muassa: taivutusominaisuudet hakaraudotteita varten, lujuusominaisuudet, palo-ominaisuudet, suunnitteluarvot sekä kemialliset ominaisuudet. FRP-tankojen käyttöönoton esteenä Suomessa on suomalaisten suunnitteluhjeiden puuttuminen.

1.3 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyö perustuu kirjallisuustutkimukseen. Työn tarkoituksena on laajentaa tietämystä selvityksen kohteena olevasta aiheesta. Tarkoituksena ei ole tehdä omaa empiiristä tutkimusta, vaan keskittyä kirjallisuudesta löytyviin tietoihin.

1.4 Opinnäytetyön tilaaja

Opinnäytetyö tehdään Destia Oy:lle, joka on yksi suurimmista infra-alalla toimivista yrityksistä Suomessa. Destia Oy suunnittelee, korjaa ja rakentaa lukuisia siltoja sekä liikenneväyliä vuosittain. Destian palvelutarjonta kattaa laajasti koko infrahankkeen elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Destian asiakkaita ovat teollisuus- ja liikeyritykset, kunnat ja kaupungit sekä valtio. (4.)

2 FRP-tuotteet

FRP-tuotteet ovat komposiitteja, joiden raaka-aineita ovat orgaaniset tai epäorgaaniset kuidut sekä niitä sitomassa hartsi. FRP-tuotteet ovat tyypillisesti joko tankoja, punoksia, levyjä, nauhoja tai kangasta. Kuvassa 1. on neljä erilaista FRP-tankoa, jotka muistuttavat ulkomuodoiltaan perinteisiä teräsraudoitteita. (1, s. 3.)



Kuva 1. Kuvassa on neljä erilaista FRP-tankoa. Kaksi keskimmäistä FRP-tankoa ovat lasikuitua ja reunimmaisten tankojen kuidut on valmistettu basaltista. Ylhäältä katsottuna toinen tanko ei kelpaa betonissa käytettäväksi tangoksi, koska siinä ei ole minkäänlaista karhennusta tai muotoilua, mikä takaisi betonin ja tangon välisen hyvän tartuntalujuuden. (Kuva: Krister Majander)

Erilaisia FRP-tuotteita, joita voidaan käyttää korvaamaan perinteisiä teräsraudoitteita tai yhdessä teräsraudoitteiden kanssa, on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. FRP-tuotteita. (1, s. 2.)

2.1 Komponentit

FRP-tangot on valmistettu kuitulujitteisista polymeereistä. Kuitulujitteiset polymeerit ovat melko uusia materiaaleja, joiden komponentteja ovat kuidut, lisäaineet sekä hartsit. Näistä muodostuu kovetuttuaan vahva komposiitti, joka on kevyt ja kestävä. (1, s. 2.)

Komposiitit ovat yhdistelmäateriaaleja, joissa yhdistetään kahden tai useamman materiaalin ominaisuudet siten, että tuloksena saatava materiaali on yhdistelmä komponenttimateriaalien parhaista puolista (5). Kuitulujitteiset komposiitit käyttävät hyväksi kuitujen hyvää vetolujuutta (6).

2.2 Kuidut

Kuitu on materiaali, joka esiintyy pitkinä säikeinä, joista voi valmistaa erilaisia materiaaleja ja tuotteita yhdistämällä säikeitä ja lisäämällä sidosaineen. Kuidut jaotellaan ta-

vallisesti luonnonkuituihin sekä tekokuituihin. Viimeksi mainittuihin luetaan mm. hiilikuidut, aramidikuidut (kevlar), lasikuidut ja muovikuidut. (7).

Yksittäisen kuidun halkaisija on yleensä noin 15 mikrometriä. Suuremmat halkaisijat kasvattavat pintavirheiden mahdollisuutta. Pituuden ja halkaisijan suhde voi olla tuhannesta äärettömään jatkuvilla kuiduilla. Yleensä 30–70 % komposiitin tilavuudesta on kuituja ja komposiitin painosta kuituja on noin 50 %. (3, s. 6.)

Kuitujen päätehtävät komposiitissa ovat kuormien kantaminen sekä jäykkyyden takaaminen, lämpöstabiilius ja muut rakenteelliset ominaisuudet. Täyttääkseen tehtävät komposiitissa kuiduilla täytyy olla suuri kimmokerroin, suuri murtolujuus, pienet lujuusvaihtelut kuitujen välillä, vakaa lujuus kuormitettuna sekä yhtenevät mitat kuitujen välillä. (3, s. 6.)

Taulukossa 1. on esitetty eri kuitujen pääominaisuuksia. Taulukosta selviää eri kuitujen tiheys, kimmokerroin, vetolujuus, kuidun halkaisija sekä murtovenymä. Taulukossa 1. esitetyt arvot ovat kuitujen lyhytaikaisarvoja. Pitkäaikaislujuudet eli suunnittelulujuudet lasketaan suunnitteluohjeilla. Pitkäaikaislujuuksien laskuihin vaikuttavat olosuhteista riippuvat kertoimet.(1, s. 8)

Taulukko 1. Kuitujen keskimääräisiä pääominaisuuksia (3, s. 8; 1, s. 8; 8, s. 31).

Ominaisuudet	Kuidut						Teräs
	Lasi		Aramidi	Basaltti	Hiilikuitu		
	E-lasi	S-lasi			High strength	High modulus	
Tiheys (g/cm ³)	2,6	2,5	1,4	2,8	1,8	1,9	7,5
Kimmokerroin (GPa)	72	87	100	89	200–400	350–650	210
Vetolujuus (GPa)	3,5	4,9	3,6	4,8	3,5	2,4–4,0	0,6–1,9
Halkaisija (µm)	3,0–20	-	12	-	9,0–18,0	9,0–18,0	Ei vertailtavissa
Murtovenymä (%)	3,5–5,0	5,6	3,0–4,4	3,1	1,3–1,8	0,4–0,8	7,0
Lämpölaajenemiskerroin (10 ⁻⁶ /°C)	5	2,9	-	8	n. 0	n. 0	10
Pitkäaikainen maksimi käyttölämpötila (°C)	200	200	200	-	400	400	300

2.2.1 Lasikuitu

Lasikuitu on erittäin ohuista lasisäikeistä valmistettu epäorgaaninen materiaali, josta valmistetaan erilaisia tuotteita, joissa lasikuidun hyvät ominaisuudet tulevat esille. Lasikuidun hyviä ominaisuuksia ovat muovailtavuus, lujuus, keveys, veden- sekä korroosionkestävyys sekä lahoamattomuus. (9.) Lasikuitua valmistetaan sulasta lasimassasta puristamalla tai puhaltamalla pienten suulakkeiden läpi, jolloin valmiiden kuitujen paksuudeksi tulee keskimäärin 3–20 mikrometriä (10, s. 25).

Kuvassa 3. on esitetty ukrainalaisen tehtaan FRP-tanko, jonka kuitumateriaalina on käytetty lasikuitua. Lasikuitutanko on väriltään yleensä vaalea tai hieman kellertävä/harmaa.



Kuva 3. Lähikuva lasikuitutangosta. Kuvassa näkyy lasikuidun kuiturakenne. (Kuva: Krister Majander)

E-lasikuidut ovat muihin kuituihin verrattuna edullisia, minkä vuoksi E-lasikuidut ovat ulkomailla käytetyimpiä kuituja rakennusalalla (3, s. 8). E-lasikuitu on myös eniten valmistettu lasikuitu. Noin 99 % kaikesta nykypäivänä valmistetusta lasikuidusta on E-lasikuitua. (11.) S-lasikuidulla on parempi vetokestävyys verrattuna E-lasikuituun, mutta S-lasikuidun korkeat valmistuskustannukset vähentävät sen käyttöä. Lasikuitujen huono puoli muihin kuituihin verrattuna on kohtalaisen pieni kimmokerroin. (10, s. 25.)



Kuva 4. Kuvassa on lasikuitukangasta rullattuna. Lasikuitukangas kovetetaan sidosaineella eli hartsilla. (3, s. 9.)

2.2.2 Hiilikuitu

Hiilikuitu nimensä mukaisesti koostuu hiiliatomeista. Säikeet ovat noin 5–8 μm halkaisijaltaan olevia kuituja. Hiilikuidusta puhuttaessa puhutaan yleensä hiilikuidulla lujitetuista muoveista eli komposiiteista. (12.)

Hiilikuitujen valmistuksessa yleisin valmistustapa on pyrolyysi. Pyrolyysissä kuumennetaan polyakrylonitriiliä, jolloin polymeeri muodostaa hiiliketjuja, jotka liittyvät pitkiksi kuituiksi. Hiilikuituja voidaan valmistaa kolmesta eri lähtömateriaalista, joita ovat polyakrylonitriili (PAN), raion sekä piki. Hiilikuidun ominaisuudet riippuvat siitä, mistä lähtömateriaalista hiilikuitu on valmistettu. (3, s. 9.)

Hiilikuidun ominaisuuksiin kuuluvat erinomainen vetolujuus sekä suuri kimmokerroin. Hiilikuidulla on myös todettu olevan hyvä väsymiskestävyys sekä hyvä kestävyys ympäristörasituksia vastaan (11, s. 19, 26).

Hiilikuidulla on kaikista FRP-tangoissa käytetyistä kuiduista parhaimmat vetolujuusominaisuudet. Parhaimmillaan hiilikuidulla on valmistusmateriaaleista sekä valmistusmenetelmästä riippuen noin 8–9 GPa vetolujuus. (1, s. 8.)



Kuva 5. Kuvassa on hiilikuitukangasta, joka on väriltään tummaa, mutta valossa hieman kimaltelevaa. (3, s. 9.)

2.2.3 Aramidikuitu

Aramidikuidut ovat orgaanisia kuituja, jotka valmistetaan aromaattisten polyamidien liuoksesta. Liuosta vedetään ja puristetaan suulakkeiden läpi, jolloin saadaan kuitu, joka on noin 10–15 mikrometriä paksu. Aramidikuitujen hyviä ominaisuuksia ovat isku- ja väsymiskestävyys, pieni virumaluku, korkeiden lämpötilojen kesto sekä kohtalainen hinta. Aramidikuitujen huonoja puolia ovat herkkyys UV-valolle sekä vedenimukyky. (11, s. 26.)

Aramidikuituja ovat mm. kevlar 49 ja kevlar 149 kuidut. Aramidikuituja käytetään silloin kun materiaalilta vaaditaan keveyttä ja suurta vetolujuutta, jäykkyyttä sekä iskusitkeyttä ja iskulujuutta. Aramidikuitujen puristuslujuus on alhainen verrattuna vetolujuuteen. Aramidikuituja voidaan käyttää myös muiden kuitujen kanssa samassa komposiitissa. Aramidikuituja voidaan lisätä esimerkiksi lasikuitukomposiittiin, jolloin saadaan kevyempi materiaali. Lasikuituja voidaan käyttää aramidikuitujen kanssa, jolloin lasikuitu parantaa komposiitin taivutus- ja puristuslujuutta ja alentaa kustannuksia. Aramidikuidut ja hiilikuidut sopivat myös hyvin yhteen. (13, s. 10.)

Suurin osa valmistetuista aramidikuiduista käytetään lentokone ja avaruusteollisuudessa, koska näillä teollisuusaloilla materiaalien ominaisuudet ovat tärkeämpiä kuin materiaalien hinnat (13, s. 10). Rakennusteollisuudessa aramidikuitujen käyttöä vähentää sen korkea hinta (1, s. 11).

2.2.4 Basalttikuitu

Basalttikuitu valmistetaan samankaltaisella menetelmällä kuin lasikuitu, mutta basalttikuidun raaka-aineina käytetään basalttia, joka sisältää plagioklaasia, pyrokseenia sekä oliiviinia. Basalttikuidussa käytettävät mineraalit vaihtelevat, mutta edellä mainitut plagioklaasi, pyrokseeni sekä oliiviini ovat yleisimpiä basalttikuidun valmistuksessa käytettyjä mineraaleja. (10, s. 26.)

Basalttikuitujen paksuus on noin 9-12 mikrometriä ja materiaaliominaisuudet ovat E- ja S-lasikuitujen välissä. Basalttikuidut sietävät lasikuitua paremmin kuumuutta sekä emäksistä ympäristöä. Basalttikuitujen hinnat ovat lasikuitujen ja hiilikuitujen välissä. Basalttikuidut eivät ole työmailla yhtä yleisiä kuin lasi- ja hiilikuidut. (10, s. 26.)

Kuvassa 6. on ukrainalaisen tehtaan basaltista valmistama FRP-tanko. Basalttikuitutanko on väriltään yleensä tumma tai musta. Tangon ympäri on kiedottu kuituja kier-teelle betonin ja tangon välisen tartuntalujuuden parantamiseksi.



Kuva 6. Kuvassa on basalttikuiduista valmistettu FRP-tanko. (Kuva: Krister Majander)

2.3 Hartsit

Hartsi on materiaali, jonka tehtävänä on sitoa kuidut yhteen ja muodostaa kuiduista kestävä ja pysyvästi kovettunut materiaali. Hartsin tehtävänä on myös jakaa kuormituksia kuitujen kesken sekä suojata kuituja ympäristörasituksilta FRP-tankojen valmistuksen, kuljetuksen ja käytön ajan. Hartsilla tulee olla suurempi murtovenymä kuin kuidulla, koska hartsin tulee kestää kuiduissa tapahtuvat muodonmuutokset ja pitää komposiitti kasassa. (10, s. 26.)

FRP-tuotteissa käytetään yleensä hartseja, jotka valmistetaan polyestereistä tai uretaanilla modifioidusta vinyylesteristä. Kanadalainen standardi hyväksyy FRP-tuotteissa käytettäviksi hartseiksi epoksin ja vinyylesterin.(1, s. 2) FRP-tuotteista puhuttaessa hartsia kutsutaan myös matriisiksi.

Taulukko 2. Hartsien ominaisuudet (8, s. 31; 10, s. 27).

Ominaisuudet	Hartsi		
	Polyesteri	Epoksi	Vinyyliesteri
Tiheys kg/m ³	1200–1400	1200–1400	1150–1350
Kimmokerroin GPa	2,1–3,45	2,75–4,10	3,0–3,5
Vetolujuus MPa	34,5–104	55–130	73–81
Lämpölaajenemiskerroin	55–100	45–65	50–75
Murtovenymä %	1,0–6,5	1,5–9,0	4,0–5,0
Pitkäaikainen maksimi käyttölämpötila (°C)	120	120–200	140

Taulukossa 2. on eriteltyinä eri hartsien ominaisuuksia lyhytaikaisarvoina. Pitkäaikaislujuudet eli suunnittelulujuudet lasketaan suunnitteluohjeissa. Pitkäaikaislujuuksien laskuihin vaikuttavat olosuhteista riippuvat kertoimet. (1, s. 8) Taulukon 2. perusteella epoksi on kestävin hartsi ja siten paras hartsi käytettäväksi FRP-tangoissa. Polyesteri ja vinyyliesteri ovat myös ominaisuuksiltaan hyväksytyjä FRP-tankojen hartseiksi (8, s. 31).

2.3.1 Epoksihartsi

Epoksihartsit ovat huoneenlämmössä nestemäisiä aineita, jotka reagoivat lisätyn kovettajan kanssa, kovettuen kiinteäksi. Epoksiryhmä reagoi kovetteen kanssa, jolloin nestemäinen epoksi kovettuu pysyvästi. Epoksihartseja on useita tyyppisiä, joten epoksihartsien ominaisuudet vaihtelevat kemiallisen rakenteen mukaan. (13, s. 8.)

Epoksihartsin kovettumisreaktion stökiometria edellyttää, että kovetetta ja harsia on oikeassa suhteessa, jotta epoksista tulee mahdollisimman kestävä. Jos kemiallisessa

reaktiossa on ylimäärä kovetetta tai hartsia jää ylimääräinen aine kovettumattomana kovettuneen epoksin sisään ja heikentää sen ominaisuuksia. (13, s. 8.)

2.3.2 Vinyyliesterihartsi

Vinyyliesterihartsien raaka-aineita ovat metakrylaatti ja akrylaatti. Joissain vinyylieste-reissä on lisäksi uretaania sekä esteriä sitovia ryhmiä. Vinyyliesterihartsi on ominai-suuksiensa puolesta paras hartsi käytettäväksi lasikuitujen kanssa. (14, s. 13.)

Vinyyliesterillä saavutettavat hyvät ominaisuudet ovat: sitkeys ja lämmönkestävyys, ympäristönkestävyys, lujuusominaisuudet sekä kuitujen hyvä kiinnittyminen. Vinyylies-terihartseilla on myös hyvä syöpymisenkestävyys. (13, s. 4.)

2.4 Lisäaineet

FRP-tangoissa käytetään epäorgaanisia lisäaineita muun muassa hartsin määrän säästämiseksi. Käytetyt lisäaineet pienentävät tällöin tankojen hintaa heikentämättä merkittävästi niiden ominaisuuksia. Lisäaineet voivat esimerkiksi lisätä lujuutta tai vis-kositeettia, muuttaa tangon väriä tai parantaa sen kemikaalien tai UV-säteilyn kestä-vyyttä. Käytetyt lisäaineet vaihtelevat sisällöltään, tyypiltään ja määrältään eri tuotteissa ja ovat usein merkittävin ero eri tuotteiden välillä. (1, s. 10.)

Lisäaineet sekoitetaan yleensä matriisiin eli hartsiin. Käytetyt lisäaineet jaetaan kah-teen ryhmään: valmistusprosessiin liittyviin lisäaineisiin ja toimintoihin liittyviin lisäainei-siin. Lisäaineita lisätään eri syistä, mutta ne vaikuttavat aina FRP-tankojen mekaanisiin ominaisuuksiin sekä palonkesto-ominaisuuksiin. Valmistusprosessiin liittyvillä lisäaineil-la on hyödyllisiä vaikutuksia itse valmistusprosessiin. Siinä voidaan lisätä esimerkiksi lisäainetta, joka estää tankojen liiallisen kutistumisen sekä hiusmurtumien syntymisen kovettumisen aikana. (3, s. 12.)

Toimintoihin liittyvillä lisäaineilla parannetaan valmiiden tankojen ominaisuuksia. Esi-merkkejä toimintoihin vaikuttavista lisäaineista ovat pigmentit ja palonestoaineet. Niitä lisätään FRP-tankoihin parantamaan tankojen palonkesto-ominaisuuksia. Palonestoai-neilla pystytään hidastamaan palon etenemistä tangoissa. (3, s. 12.)

3 FRP-tankojen ominaisuudet

FRP-tankojen ominaisuudet määräytyvät kolmen komponentin ominaisuuksien mukaan. Komponentteja ovat: orgaaniset tai epäorgaaniset kuidut, polymeerihartsit ja mahdolliset epäorgaaniset lisäaineet. Valmiiden tankojen fysikaaliset ominaisuudet ovat riippuvaisia kuitujen mekaanisista ominaisuuksista, kuitujen suunnasta, kuitujen pituudesta, kuitujen muodosta, kuitujen mahdollisesta yhdistelystä, hartsin mekaanisista ominaisuuksista sekä kuitujen ja hartsin välisestä tartunnasta. Myös lisäaineilla on vaikutusta tankojen fysikaalisiin ominaisuuksiin. (1, s. 7.) Taulukossa 1. (sivulla 7.) on esitetty jänneteräksen ja eri kuitujen keskimääräisiä lujuusominaisuuksia. Taulukossa esitetyt arvot ovat kuitujen ominaisarvoja.

Betonissa käytettävien teräsraudoitteiden lämpölaajenemisominaisuudet ovat hyvin lähellä betonin lämpölaajenemisominaisuuksia. Materiaalien tulee käyttäytyä samalla tavalla lämpötilan vaihteluissa, jotta rakenne voi toimia oikein ja kestä nopeitakin lämpötilan muutoksia. FRP-lasikuitutankojen lämpölaajenemisominaisuuksien on todettu olevan vielä lähempänä betonin lämpölaajenemisominaisuuksia kuin teräsraudoitteiden. (1, s. 9.) Tutkimusten mukaan FRP-tankojen poikittaissuuntainen lämpölaajeneminen on kolme kertaa suurempaa kuin pituussuuntainen lämpölaajeneminen. Edellä mainittu voi aiheuttaa betonin halkeilua jos paksuja FRP-tankoja asennetaan aivan betonin pintaan. (14.)

Teräsraudoitteet johtavat sekä sähköä, että lämpöä. Hyvien lujuusominaisuuksien ja keveyden lisäksi FRP-tuotteet eivät yleensä johda sähköä (riippuu käytetyistä kuiduista, hiilikuitu johtaa sähköä) tai lämpöä eivätkä magneettikentät vaikuta niihin. Lämmön johtamattomuuden takia FRP-tuotteet eivät toimi kylmäsiltoina rakenteissa. Joissain erikoisissa talonrakentamisen sovellutuksissa voi olla hyötyä siitä, että tangot eivät reagoi magneettikenttiin. (1, s. 10.)

FRP-tuotteiden palonkesto-ominaisuudet ovat huonommat kuin teräksellä. Niiden palonkesto-ominaisuudet eivät aina ole riittäviä talonrakennuskohteisiin, siltarakentamisessa palonkesto-ominaisuudet eivät yleensä aiheuta ongelmia. (1, s. 10.)

3.1 Tiheys

FRP-tangot ovat huomattavasti kevyempiä kuin teräsraudoitteet. Tankojen painoerot johtuvat raaka-aineiden tiheyksien eroista. FRP-tangoissa käytettyjen kuitujen tiheydet ovat noin 1,8–2,8 g/cm³ kun teräksen tiheys on noin 7,5 g/cm³. FRP-tangoissa käytetty sidosaine eli hartsi on hieman kevyempää kuin kuidut eli noin 1,2–1,4 g/cm³. (1, s. 8, 9.) FRP-tankojen paino määräytyy sen mukaan, kuinka suuri osa tangon tilavuudesta on kuituja. Yleensä kuituja on 30–70% tangon tilavuudesta (3, s. 6).

FRP-tangot ovat siis noin neljä kertaa kevyempiä kuin teräsraudoitteet. Tankojen keveydestä on hyötyä tankoja asennettaessa sekä kuljetettaessa. Valmis rakenne on myös hieman kevyempi silloin kun käytetään FRP-tankoja teräsraudoitteiden sijaan. (16, s. 8.)

3.2 Lujuus

Kuidut kantavat suurimman osan tankoihin tulevasta kuormituksesta, joten kuiduilla on suurin merkitys FRP-tankojen lujuuteen. Merkittävässä osassa on kuitujen ja hartsin tilavuuden suhde, joka vaikuttaa tangon lujuuteen ja jäykkyyteen. FRP-tangoilla voi olla samat mitat, mutta eri lujuusominaisuudet. Tämän takia eri valmistajien tangot eivät ole vertailukelpoisia mittojen perusteella, mikä vaikeuttaa FRP-tankojen käyttöä. (16, s. 9.)

FRP-tangoissa käytettyjen kuitujen vetolujuudet ovat noin 2,5–8,0 GPa ja teräsraudoitteiden vetolujuus on noin 0,6–1,9 GPa riippuen teräksen laadusta. FRP-tangoissa käytettyjen kuitujen vetolujuudet ovat siis parhaimmillaan 2-5-kertaisia jänneteräksen vetolujuuteen verrattuna ja jopa 10-kertaisia verrattuna harjateräkseen. FRP-tankojen vetolujuudet ovat kuitenkin pienempiä, sillä hartsin vetolujuus on oleellisesti pienempi kuin kuitujen vetolujuus. Esimerkiksi hiilikuitutangolle annetaan vetolujuuden suunnitteluarvon takuarvoksi 1,6 GPa, joka on laskettu vähentämällä hiilikuitutangon vetolujuuden ominaisarvosta kolminkertainen keskihajonta. Hiilikuitutangon vetolujuuden suunnitteluarvo on kuitenkin yli kaksi kertaa suurempi kuin harjateräksen. (1, s. 8.)

FRP-tangon leikkauslujuus on pienempi kuin sen vetolujuus. FRP-tangoissa käytetyt kuidut ovat vahvoja kuitujen suunnassa, mutta eivät yhtä vahvoja kuituja vastaan kohti-

suorassa suunnassa. FRP-tankoja Ukrainassa valmistavan tehtaan mukaan lasikuidulla lujitetun FRP-tangon leikkauslujuus on noin 172 N/mm^2 eli noin 0.172 GPa . (14.)

FRP-tankojen leikkauslujuutta pystytään parantamaan punomalla kuituja poikittain tangon pitkittäissuuntaisten kuitujen ympärille. FRP-tankojen valmistajat toimittavat tarkat leikkauslujuustiedot eri käyttötarkoituksia varten. (16, s. 32.)

3.3 Murtovenymä

FRP-tankojen murtovenymä on usein pienempi kuin teräsraudoitteilla. Tämä tarkoittaa sitä, että betonirakenteen murtuma on niin kutsuttu haurasmurto FRP-tankoja käytettäessä. Haurasmurto tarkoittaa sitä, että rakenne ei varoita betonin halkeamilla ja rakenteen taipumisella liian suuresta kuormituksesta, vaan rakenne murtuu äkillisesti kun betonin puristuslujuus ylittyy rakenteen puristuspinnassa. Teräsraudoitteita käytettäessä betonirakenteeseen syntyy halkeamia ja rakenne taipuu huomattavasti ennen kuin se murtuu. (1, s. 9.)



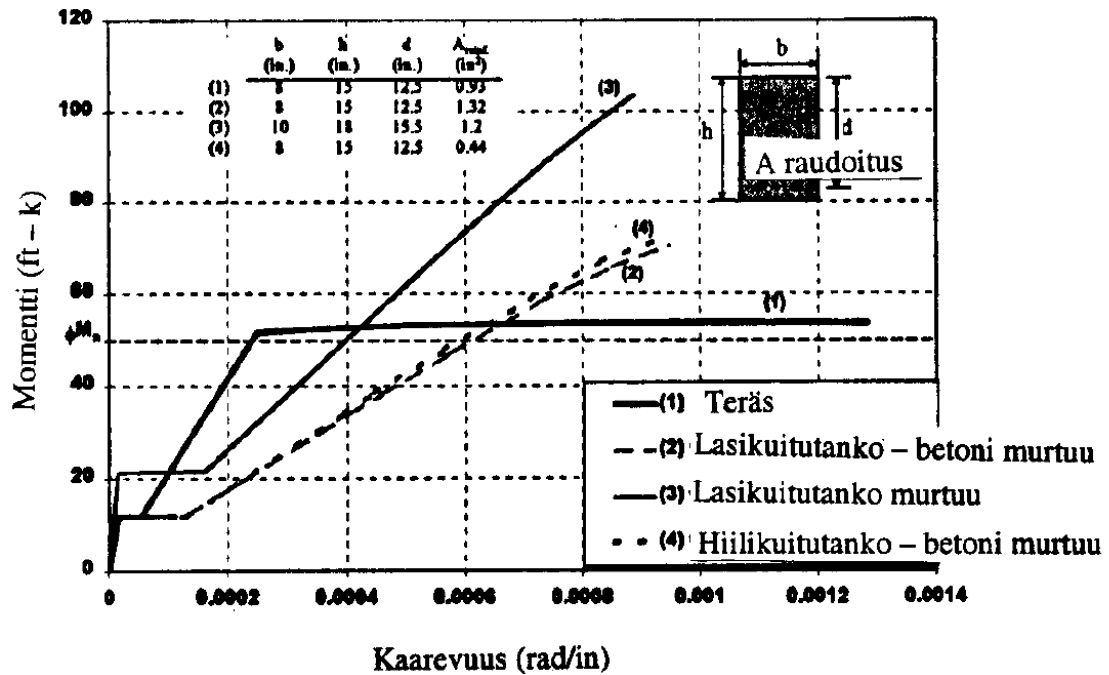
Kuva 7. Kuvan betonipalkissa on tapahtunut haurasmurtuma. (14.)

FRP-tankojen pienen murtovenymän takia täytyy tankojen lujuuksien ja käyttötilan kriteerien oltava riittäviä. Tavallisesti FRP-tankojen sitkeyden puute korvataan rakenteen mitoituksessa korkealla lujuusreservillä, jotta haurasmurtoa ei pääse syntymään. Rakenteen vaurioitumisen varalta suunnittelussa käytettävät varmuuskertoimet ovat korkeampia kuin teräs- ja jännebetonirakenteissa perinteisesti. Suurempien varmuuskertoimien käyttö on mahdollista FRP-tankojen korkeiden lujuusominaisuuksien myötä. (1, s. 9.)

Kuvassa 8. on esitetty betonipalkin teoreettinen murtumismalli erilaisille tangoille, joilla on keskenään sama kapasiteetti. Murtumismallissa on esitetty betonipalkit, joissa on käytetty tankoina teräsraudoitteita, lasikuitutankoja sekä hiilikuitutankoja. Lasikuitutankoja sisältävän betonipalkin mitat ovat suuremmat kuin muiden palkkien, koska muuten lasikuitutankoja sisältävällä palkilla olisi muita palkkeja pienempi kapasiteetti. (1, s. 9.)

Kuvasta 8. nähdään, että poikkileikkauksessa, jossa on käytetty lasikuitutankoa ja betonipalkki murtuu, tapahtuu haurasmurto. Tapahtuman kuvaaja etenee suoraviivaisesti kunnes betoni murtuu äkillisesti ja rakenne jää murtuneiden lasikuitutankojen varaan tai sortuu kokonaan. Kun lasikuitutangoilla raudoitetun betonipalkin kuvaajaa verrataan terästangoilla raudoitetun betonipalkin kuvaajaan, huomataan, että teräsraudoite venyy, jolloin betonipalkki taipuu ja betoni alkaa halkeilla ensin betonipalkin vetopuolelta. Rakenteen taipuminen ja betonin halkeileminen toimii varoituksena tulevasta murtumasta. Lasikuitutangoilla raudoitettu palkki ei käyttäydy samoin. Edellä esitettyjen syiden vuoksi Suomessa olisi harkittava FRP-tankojen käyttöä vain siltojen säilyvyyden kannalta kriittisimmissä kohdissa kuten reunapalkeissa. (1, s. 9.)

Huomionarvoista on, että lasikuitutangoilla raudoitettu palkki kestää huomattavasti suuremman momentin ennen murtumaa, kuin terästangoilla raudoitettu palkki. (1, s. 9.)



Kuva 8. Kuvassa on esitetty betonipalkin teoreettinen murtumismalli käytettäessä perinteisiä teräsraudoitteita sekä FRP-tankoja. Kuvassa on amerikkalaiset yksiköt. (1, s. 9.)

3.4 Kestävyys

FRP-tuotteiden pitkäaikaisominaisuuksia on tutkittu paljon, mutta käytännön kokemuksia on vasta noin 25–30 vuoden ajalta. Esimerkiksi sillan reunapalkissa FRP-tankojen tulisi kestää noin 100 vuotta, jotta niiden käytöstä saataisiin kustannussäästöjä. Tähän asti kertyneet kokemukset pitkäaikaisominaisuuksista ovat olleet suurimmaksi osaksi positiivisia. (1, s. 9.)

Viruminen eli tangossa tapahtuva plastinen muodonmuutos on todettu tutkimuksissa merkittävimmäksi ongelmaksi lasikuitutangoille. Hiilikuitutangoilla viruminen on huomattavasti vähäisempää. Viruminen on tunnettu FRP-tankojen ominaisuus ja sen mittausta varten on kehitetty standarditesti. Viruminen otetaan rakenteen mitoituksessa huomioon, kun määritellään tankojen suunnittelulujuuksia niin sanotun ympäristökertoimen avulla. Ympäristökerroin annetaan erikseen eri materiaaleille eli hiillelle, lasille ja aramidille. (1, s. 9.)

FRP-tankojen kemikaalien kestävyttä on tutkittu ja tutkimuksissa on todettu, että FRP-tangot kestävät betonissa olevia kemikaaleja. Kuitenkin osa betonissa olevista kemikaaleista saattaa vaikuttaa kuituihin, mutta ei yleensä kuituja suojaavaan hartsiin. FRP-tankojen on myös todettu kestävän joitain heikkoja happoja ja heikkoja emäksiä. Taulukossa 3. esitetään kuitujen ja hartsien reaktiivisuutta kun ne altistuvat erilaisille kemiallisille rasituksille. Taulukossa on esitetty materiaalien reagointi seuraaville rasituksille. (8, s. 33.)

- Veden imeytyminen: Kaikki sillan osat joutuvat veden aiheuttamalle rasitukselle. Materiaaliin imeytyvän veden määrä vaikuttaa materiaalin kestävyysominaisuuksiin. Suurta veden imeytymistä materiaaliin pyritään välttämään, koska se johtaisi tankojen tilavuuksien muutoksiin sekä vaikuttaisi kuidun ja hartsin kemialliseen rakenteeseen. (8, s. 33.)
- Heikot hapot: Hapot, joiden pH on 4 ja 7 välillä ovat heikkoja happoja. Heikkoja happoja voi syntyä happosateen tai ympäristön karbonatisoitumisen takia. Heikkoja happoja esiintyy useimmiten tiheästi asutuissa kaupunkiympäristöissä. Teolliset prosessit ovat myös mahdollisia heikkojen happojen lähteitä. (8, s. 33.)
- Vahvat hapot: Hapot, joiden pH on alle 4, ovat vahvoja happoja. FRP-tangot voivat joutua kosketuksiin vahvojen happojen kanssa esimerkiksi onnettomuus-tilanteessa. Vahvoja happoja ei kuitenkaan käytännössä huomioida FRP-tankojen kestävyden uhkaajiksi, koska niiden joutuminen kosketuksiin tankojen kanssa on hyvin harvinaista. (8, s. 33.)
- Heikot emäkset: Emäkset, joiden pH on 7 ja 10 välissä kutsutaan heikoiksi emäksiksi. Heikkoja emäksiä syntyy betonissa. Heikot emäkset aiheuttavat eniten ongelmia lasikuidun kanssa. (8, s. 33.)
- Vahvat emäkset: Emäkset, joiden pH on suurempi kuin 10 kutsutaan vahvoiksi emäksiksi. Vahvoja emäksiä syntyy betonissa, jossa on Portland-sementtiä. Vahvat emäkset aiheuttavat eniten ongelmia lasikuidun kanssa. (8, s. 33.)
- Orgaaniset liuottimet: Taulukossa 3. orgaanisilla liuottimilla tarkoitetaan öljypohjaisia liuottimia. (8, s. 33.)

- UV-säteily: Kaikki suoralle tai epäsuoralle auringonvalolle altistuvat materiaalit altistuvat UV-säteilylle, koska auringonvalo sisältää UV-säteitä. Jotkut lamput tuottavat myös UV-säteitä. (8, s. 33.)

Taulukko 3. Taulukossa on esitetty FRP-tangoissa käytettyjen materiaalien reaktiivisuus. (8, s. 33.)

Materiaali	Veden imeytyminen	Heikot hapot	Vahvat hapot	Heikot emäkset	Vahvat emäkset	Orgaaniset liuottimet	UV-säteily
E-lasikuitu	R	Rh	R	R	R	R/Rh	Rh
S-lasikuitu	R	Yv	Rh	R	R	R/Rh	Rh
Hiilikuitu	Yv	Yv	Y	Yv	Yv	Yv	Yv
Aramidikuitu	-	Rh	Rh	Yv	Rh	R	Yv
Polyesteri harts	-	Rh	R	R	R	Rh	R
Vinyylesteri harts	-	Yv	Yv	Yv	Yv	Yv	Rh
Epoksi harts	-	Yv	Rh	Yv	Yv	Yv	Yv

Selitys: R Reagoi

Rh Reagoi hieman

Yv Yleensä vastustuskykyinen

FRP-tankojen suola- ja pakkaskestävyys

Betonissa käytettyjen FRP-tankojen suola- ja pakkaskestävyys on rakenteen säilyvyyden kannalta erittäin tärkeää. FRP-tangot on todettu elinkaarikustannuksiltaan edullisiksi betonisilloissa 100 vuoden suunnittelukäyttöään puitteissa. 100 vuotta on kuitenkin pitkä aika mille tahansa materiaalille ja etenkin sellaiselle materiaalille, johon kohdistuu suola- ja pakkasrasitusta satoja kertoja käyttöään aikana. (19, s. 1.)

FRP-tangot eivät ruostu pakkas-suolarasituksessakaan, mutta niiden vetolujuus pienenee. Contesta Oy on tutkinut FRP-tankojen suola- ja pakkaskestävyyttä Suomessa laboratoriossa, jossa on yritetty jäljitellä suomalaisia olosuhteita. Tutkimuksessa tehtiin kuitenkin vain lyhytaikaisia laboratorikokeita ja pääasiassa vain lasikuitutangoille. Tutkimuksessa ei myöskään huomioitu FRP-tankojen kaikkien ominaisuuksien kuten esimerkiksi kimmokertoimen ja murtovenymän muutoksia tangoissa, vaan keskityttiin vain muutamaa keskeiseen ominaisuuteen suppeiden koesarjojen ja alustavien kokeiden avulla. (19, s. 1.)

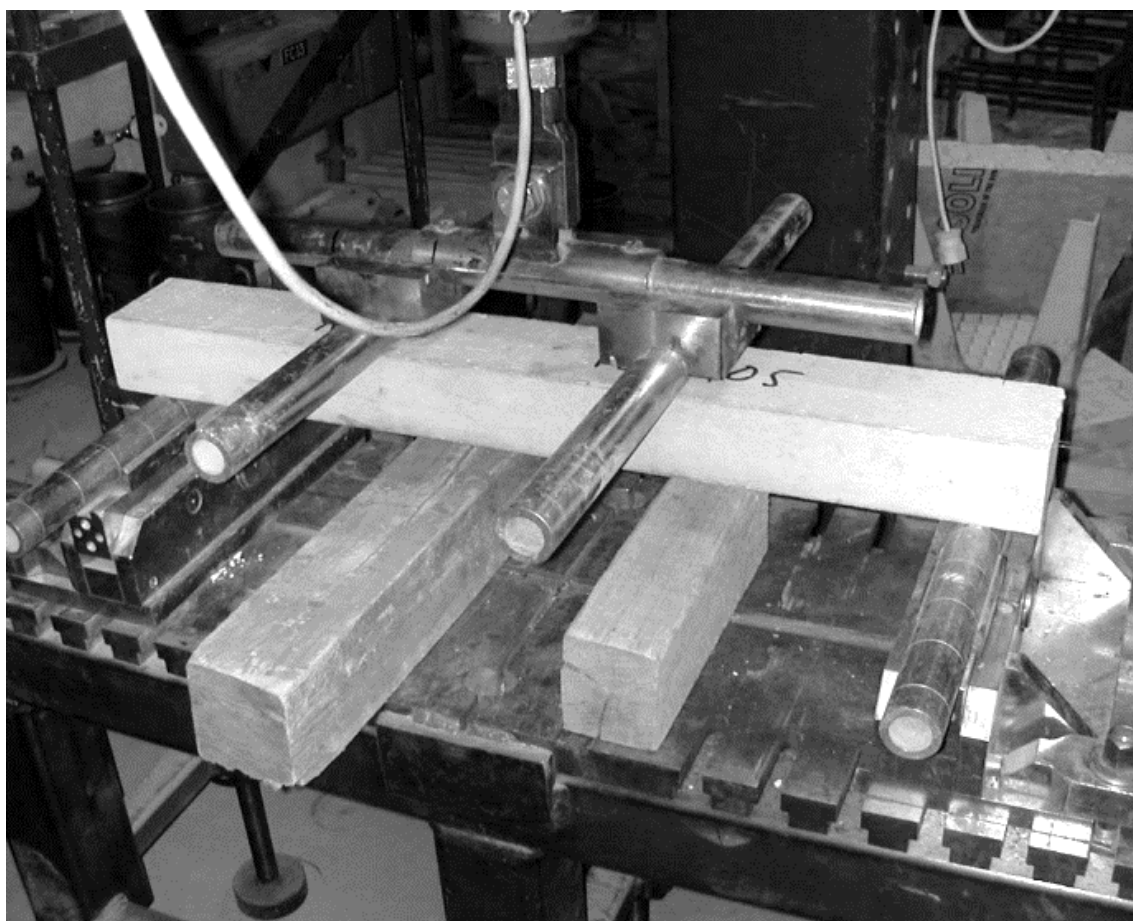
Contesta Oy:n tekemässä tutkimuksessa kolme lasikuitutankoa ja kolme hiilikuitutankoa säilytettiin kylläisessä suolaliuoksessa 6 kk:n ajan. Kolmelle suolaliuoksessa säilytetylle lasi- ja hiilikuitutangolle tehtiin vetolujuuskokeet tämän jälkeen. Kolmelle muulle lasi- ja hiilikuitutangoille vetokoe tehtiin jo kolmen kuukauden suolaliuosrasituksen jälkeen. (19, s. 6.)

Suola- ja pakkaskestävyyttä mitattiin siten, että lasi- ja hiilikuitutankoja rasitettiin 100 syklin verran. Osaa tangoista rasitettiin vain 50 syklin verran, jotta saatiin vertailutietoa. Suola- ja pakkasrasitettujen tankojen pintarakennetta tutkittiin ennen vetokoetta. Tarkasteluissa ei havaittu merkittäviä ulkoisia muutoksia tangoissa rasitusyönten jälkeen. (19, s. 6.)

Tankojen vetolujuuskokeessa mitattiin vain tankojen murtovoima, joka heikkeni lasikuitutangoilla noin 13 % 50:n pakkas- ja suolasyklin jälkeen ja 100 syklin jälkeen se oli pienentynyt alkuperäisestä noin 24 %. Hiilikuitutankojen vetolujuudet pienenevät rajummin kuin lasikuitutankojen. Hiilikuitutankojen vetolujuudet pienenevät noin 33 % 50:n pakkas- ja suolasyklin jälkeen ja 100 syklin jälkeen vetolujuus oli pienentynyt noin 58 %. Tangoille tehtiin myös pelkkä suolarasituskoe, jossa todettiin, että lasikuitutankojen

vetolujuus ei muuttunut oleellisesti kolmen kuukauden jälkeen, mutta kuuden kuukauden suolarasituksen jälkeen se oli pienentynyt 14 %. Hiilikuitutankoihin pelkkä kylläinen suolaliuos vaikutti enemmän. Hiilikuitutankojen vetolujuus oli pienentynyt kolmen kuukauden suolarasituksen jälkeen noin 28 % ja kuuden kuukauden jälkeen noin 39 %. (19, s. 2.)

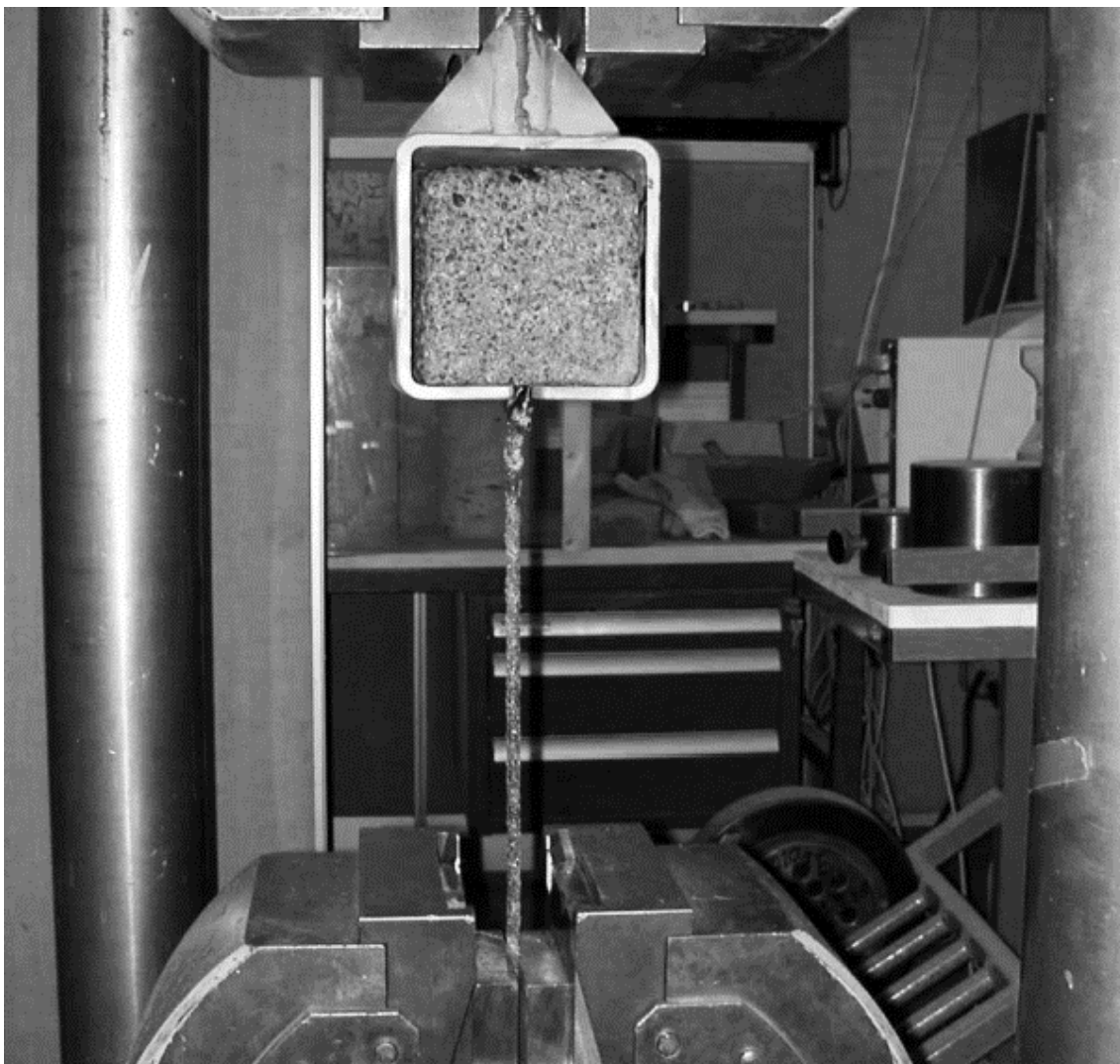
Tutkimuksessa valmistettiin myös betonipalkkeja ($100 \times 70 \times 820 \text{ mm}^3$), joiden alapinnan vetotankona oli lasikuitutanko. Betonipalkkien taivutuslujuuksien muutokset mitattiin 100 pakkas- ja suolasyklin jälkeen. Betonipalkeissa käytettiin koebetonina huokostettua (ilmapitoisuus 4,5 %) betonia suolan imeytymisen nopeuttamiseksi. Betonin vesisideainesuhde oli 0,75. Sementtinä käytettiin yleissementtiä (CEM II/A-M(S-LL)42,5N ja sementin määrä oli 292 kg/m^3 . Lasikuitu- ja hiilikuitutangot olivat Kanadassa valmistettuja tankoja, jotka olivat halkaisijaltaan 6 mm ja pinnoitteena oli kvartsihiekkapinnoite. (19, s. 4.)



Kuva 9. Betonipalkkien taivutuslujuus määritettiin kuvassa esiintyvällä laitteistolla. (19, s. 8.)

Lasikuitutangon sisältäneiden palkin taivutuslujuus oli pienentynyt 50:n pakkas- ja suolasyklin jälkeen noin 18 %, mutta 100 syklin jälkeen taivutuslujuus oli pienentynyt vain 3 % enemmän. Pakkas- ja suolarasitusten jälkeen kaikkien betonipalkkien pinnasta oli syöpynyt sementtiliimaa 1-2 mm. (19, s. 2, 4.)

Samassa tutkimuksessa tutkittiin myös suola- ja pakkasrasitusten vaikutusta lasi- ja hiilikuitutankojen tartuntavoimaan. Tutkimusta varten valettiin 100 x 100 x 100 mm³ betonikuutioita, joiden keskelle asennettiin lasi- ja hiilikuitutankoja. Jokaisen betonikuution keskelle asennettiin yksi tanko keskeisesti. Tutkimuksessa havaittiin, että lasikuitutangon ja betonin välinen tartuntalujuus heikkeni noin 10 % 100 pakkas- ja suolasyklin jälkeen. Hiilikuitutangoilla ei havaittu merkittäviä muutoksia 100 syklin jälkeen. (19, s. 5.)



Kuva 10. Lasikuitutangon ja betonikuution tartuntalujuuden määrittäminen suoritettiin tutkimuksessa kuvan laitteistolla. (19, s. 3.)

Johtopäätöksenä Contestan tekemälle tutkimukselle voidaan pitää, että suola- ja pakkasrasitukset heikentävät lasi- ja hiilikuitutankojen vetolujuutta merkittävästi. On kuitenkin otettava huomioon, että betonin sisällä muutokset ovat huomattavasti pienempiä. Huononkin betonin sisällä olevat lasi- ja hiilikuitutangot säilyttävät vetolujuuden paremmin kuin suorassa rasituksessa olevat tangot. Hyvä betoni suojaa lasi- ja hiilikuitutankoja kloridi- sekä pakkasrasitukselta. Jos lasi- ja hiilikuitutankoja suojaava betonipeite läpäisee klorideja, on pitkällä aikajänteellä kloridirasituksen tuloksena tankojen vetolujuuden pienenemisen vaara. (19, s. 2.)

4 FRP-tankojen käsittely ja varastointi

FRP-tangot eli komposiittitangot ovat hyvin kestäviä, mutta väärinkäytettyinä ne ovat alttiita pinnan vaurioitumiselle. FRP-tankojen huolellinen käsittely on tarpeen. Kuljetuspakkausten avaamisessa tulee olla huolellinen, koska terävällä esineellä tehdyt viillot vähentävät tankojen kestävyyttä. Varastointi-, käsittely- ja asennusvaiheessa tulee myös olla huolellisempi kuin teräsraudoitteiden kanssa. (1, s. 3.)

Työmaan olosuhteiden salliessa FRP-tangot tulisi toimittaa ja varastoida erillisessä varastossa, jotta vältetään tankojen vaurioilta. FRP-tankoja tulisi käsitellä, varastoida ja asentaa samoin kuin epoksinnoitettuja raudoitteita ja huolellisemmin kuin tavanomaisia teräksiä. (1, s. 3.)

4.1 Käsittelyssä huomioitavaa

FRP-tankoja käsiteltäessä tulisi noudattaa seuraavia ohjeita, jotta vältetään tankojen ja niiden käsittelijän vahingot. (1, s. 4.)

- Jokainen työntekijä perehdytetään siihen, kuinka FRP-tankoja käsitellään ja kuinka ne käyttäytyvät niitä käsiteltäessä.
- FRP-tankoja ja -punoksia käsiteltäessä tulee käyttää kestäviä työhanskoja. Tankojen terävät kulmat voivat aiheuttaa viiltoja ja tangoista saattaa irrota teräviä kuitujen säikeitä.
- FRP-tangot ovat korroosionkestäviä, joten ne kestävät hyvin kosteita olosuhteita, mutta niihin voi tulla pintavaurioita ultraviolettiasteilystä tai kemiallisista aineista jos ne altistuvat pitkiksi ajoiksi. Jos tankoja säilytetään ulkona, tulee ne peittää läpinäkymättömällä muovilla tai peitteellä, joka suojaa auringonvalolta sekä kemiallisilta aineilta.
- FRP-tankoja voidaan säilyttää ulkona, mutta tankojen ja maaperän väliin tulee asentaa puualusta esimerkiksi lautatavarasta, jotta tangot pysyvät maasta irti ja ovat helposti käsiteltävissä.

- FRP-tuotteita toimitetaan tankoina ja rullina tangon halkaisijan mukaan. Rullina toimitettavat FRP-tuotteet saattavat olla satojen metrien pituisia tankoja, jotka on kierretty rullalle kuljetusta ja varastointia varten. Rulla tulee avata harkiten, koska jos rullan kaikki sidonnat avataan yhdellä kerralla aukeaa koko rulla suurella voimalla, jolloin voi sattua tapaturmia. Rullan avaamisessa käytetään siihen suunniteltua apuvälinettä, joka estää rullan voimakkaan aukeamisen. Kuvassa 11. on FRP-tankoja rullattuna odottamassa kuljetusta työmaalle.



Kuva 11. Kuvassa on FRP-tankoja suorina tankoina sekä rullalle käärittyjä tankoja. (20.)

- FRP-tangot ovat kevyitä ja joustavia verrattuna terästankoihin, joten niiden nostot tulee tehdä varovaisesti ja harkiten.
- FRP-tangot voi katkaista helposti ja nopeasti metallisahalla tai kulmahiomakoneella. Niitä ei saa leikata leikkureilla. (1, s. 4.)

4.2 Asentamisessa huomioitavaa

FRP-tankojen asentamisessa on otettava huomioon tankojen keveys sekä hauraus. Myös jatkospituudet ja jatkoksien tekeminen on otettava huomioon FRP-tangoilla raudoitettaessa. (1, s. 4.)

- FRP-tangot sijaitsevat betonirakenteessa yleensä samoin kuin teräsraudoitteet. Jos muuta ohjeistusta ei ole annettu, asennetaan komposiittitangot samojen sijaintitoleranssien mukaan kuin teräsraudoitteet.
- FRP-tangot ovat hyvin kevyitä, joten niiden paikalla pysymiseen betonoitaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota. Tangot tulee tukea hyvin paikoilleen. Tankojen saamiseksi oikeaan korkeuteen ja asemaan voidaan käyttää muovisia tai muita korroosionkestäviä välikkeitä.
- Valmiin FRP-raudoituksen päällä voi kävellä ja FRP-raudoituksen voi tarkastaa sen päällä kävelemällä, mutta tulee varmistua, etteivät tangot siirry pois paikoiltaan tai, ettei FRP-raudoitus muuten vaurioidu.
- FRP-tankojen sidontaan voidaan käyttää muovi- tai nailonsiteitä silloin kun korroosionkestävyys ja metallien välttäminen on ehdoton vaatimus. Kuvassa 12. on FRP-tangot sidottu toisiinsa kiinni muovista valmistetuilla nippusiteillä.



Kuva 12. FRP-tangot voidaan sitoa yhteen esimerkiksi nippusiteillä. (21.)

- FRP-tanko voidaan liittää yhteen metallitangon kanssa. Tankojen sitomisessa ei saa käyttää mekaanista sidettä, joka voisi vahingoittaa FRP-tankoa.
- Tankojen jatkamiseen voidaan käyttää limittämällä yhteen sidottuja tankoja. FRP-tankojen päitä ei voida yhdistää tai hitsata yhteen. FRP-tankoja saa myös rullattuna, jolloin rullasta voidaan katkaista sopivan pituinen tanko, jolloin jatkosta ei tarvita.
- Jatkospituus riippuu betonin lujuudesta, tangon koosta, tangon sijainnista sekä betonipeitteestä. Jos muuta ohjetta ei ole annettu, voidaan jatkospituuden nyrkisääntönä käyttää 40 kertaa tangon halkaisijaa. (1, s. 4.)

4.3 FRP-tankojen taivuttaminen

FRP-tanko on komposiitti, joka on yleensä kovettunut kuumuudessa eikä sitä voi taivuttaa kovettumisen jälkeen eli kun se on polymerisoitunut. Tankoja ei voi taivuttaa työmaalla jos tangot on toimitettu suorina ja täysin kovettuneina. (1, s. 4.)

Tankojen taivutukset voidaan tehdä vain tankojen valmistusprosessissa. Tangot voidaan taivuttaa kaikkiin niihin muotoihin, joita vaaditaan terästangoiltakin. FRP-tankoja

taivutettaessa taivutussäteet ovat hieman suurempia kuin teräsraudoitteilla. Tankojen taivutussäteen yleisohjeena voidaan pitää, että kertomalla tangon halkaisija kertoimella 3,5 saadaan minimi taivutussäde 90 asteen taivutukselle. Samalla yleisohjeella saadaan 180 asteen minimi taivutussäde, kertomalla tangon halkaisija kertoimella 7. (1, s. 5.)

Sellaisissa rakenteissa, joissa taivutuksen mitat ovat kriittisiä, on otettava yhteyttä tankojen toimittajaan, joka voi vaikuttaa tankojen taivutusominaisuuksiin. (1, s. 5.)

Valmiiksi taivutettuja tankoja käytettäessä on huomioitava, että tangon lujuus on heikompi taivutuskohdassa. Testeissä on todettu, että suoran tangon suunnittelulujuudesta noin 50–60 % säilyy 90 asteen taivutuksessa. (1, s. 5.)

5 FRP-tankojen käyttö ulkomailla

FRP-tankoja on käytetty ulkomailla erityisesti silloin, kun on ollut suuri riski raudoituksen korroosiolle. Raudoitukset ovat erityisen alttiita korroosiolle merisatamissa ja muissa paikoissa, joissa rakenteet ovat alttiita suolalle kuten silloissa ja pysäköintitaloissa. FRP-tankoja on käytetty myös tapauksissa, joissa on ollut kysymys rakenteista, joissa laitteet ovat aiheuttaneet sähkö- ja magneettikenttiä raudoitusten ympärille. Ulkomailla on myös käytetty FRP-materiaaleista valmistettuja sideneuloja, pultteja ja muttereita. (1, s. 12.)

5.1 Infrarakentamisen esimerkkejä

Tunnelien vahvistaminen

FRP-tuotteita on käytetty betonirakenteiden vahvistamiseen katostaan vaurioituneiden rautatie- ja maantietunneleiden korjauksissa. Korjauksilla on pystytty pidentämään tunneleiden käyttöikä. Tunneleiden vahvistamisia FRP-tuotteilla on kokeiltu ainakin Japanissa, missä katon vahvistamiseen käytettiin FRP-kangasta. (1, s. 13.)

Vaikka FRP-tuotteita käyttämällä on saatu hyviä tuloksia tunneleiden vahvistamisesta, on samalla myös todettu, että jatkotutkimuksia tarvitaan vielä. (1, s. 13.)

Satamarakenteet

Komposiittitankojen hyvät korroosionkesto-ominaisuudet sekä kestävyys tekevät niistä sopivia ankariin olosuhteisiin kuten satama-alueisiin, aallonmurtajiin ja laitureihin. Qatarissa on toteutettu satamarakenteita käyttämällä ei-metallisia tuotteita. (1, s. 13.)



Kuva 13. FRP-tangot sopivat hyvin käytettäviksi betonilaitureissa sekä ponttoneissa, koska ne ovat jatkuvassa meriveden aiheuttamassa kloridirasituksessa. (14.)

Paalut

FRP-tankoja on käytetty paaluraudoituksena sekä sillan- että talonrakennuksessa.

Etenkin laitureiden paalut ovat jatkuvassa kloridirasituksessa merivedessä. Paaluissa on käytetty FRP-tankoja paalujen raudoituksina sekä FRP-materiaalilla päällystettyjä betoni- ja teräspaaluja. (1, s. 13.)



Kuva 14.. Kuvassa on FRP-tuotteista valmistettu paaluraudoitus. Tankojen ympärille on asetettu FRP-panta, joka tekee FRP-raudoituksesta tukevan. (14.)

Pengerrykset

FRP-materiaaleista valmistettuja maaperäneuloja on käytetty useissa raudoiteverkon kiinnityksissä pengerrysten ja kallioseinämien tuennassa (1, s. 13).

Sähköpylväät

Esijännitettyjä hiilikuitujännelankoja on käytetty sähköpylväissä. Saksassa on rakennettu vuonna 2000 sähköpylväitä, joissa on hyödynnetty hiilikuitujännelankoja. (1, s. 13.)

5.2 Talonrakentamisen esimerkkejä

Talonrakentamisessa FRP-tuotteita on käytetty erilaisissa sovellutuksissa, joissa FRP-tuotteiden hyviä ominaisuuksia pystytään hyödyntämään tehokkaasti. FRP-tuotteita on käytetty seuraavissa sovellutuksissa ulkomailla. (1, s. 13.)

- Betonipalkkeja ja laattoja on vahvistettu liimattavilla hiilikuitunauhoilla.
- Paaluissa teräsraudoitteita on korvattu FRP-tangoilla.

- Betonisandwich-elementtien sideneuloina on käytetty FRP-materiaaleista valmistettuja sideneuloja.
- Parveke-elementtien raudotteina on käytetty komposiittitankoja.
- Sisätiloihin rakennettujen uima-altaiden raudotteina on käytetty FRP-tuotteita.
- Pysäköintitaloissa FRP-tuotteita on käytetty sekä uudisrakentamisessa, että pysäköintihallien korjauksissa. Pysäköintihallien korjauksissa FRP-tuotteita on käytetty muun muassa laattojen yläpintojen vahvistuksina.
- Komposiittitankoja on käytetty harkkoseinien saumojen raudotteina sekä seinien vahvisteina. (1, s. 13, 14.)

5.3 Siltarakentamisen esimerkkejä

FRP-tuotteita on käytetty siltarakentamisessa ulkomailla jo yli 30 vuotta. Ensimmäinen kokonaan FRP-tuotteista rakennettu silta valmistui Kiinassa vuonna 1982 (Miyun silta). Miyun sillan jänneväli on 20.7 metriä ja leveys 9.8 metriä. Sen rakenne koostuu kuu-desta käsin laminoidusta kannatinpalkista, jotka ovat lasikuitu/polyesteri sandwich-elementtejä. (3, s. 21, 62.)

Esimerkki Englannista

Ensimmäinen pelkästään FRP-tangoilla raudoitettu silta Euroopassa on Fidgettin kävelysilta Chalgrovessa Oxfordshiressä Englannissa. Se rakennettiin vuonna 1995. Silta koekuormitettiin rakentamisen jälkeen ja sen ominaisuuksia seurattiin tarkoin vuoden ajan ja mitään merkittäviä ongelmia ei ilmennyt. Fidgettin kävelysillan rakentamisen jälkeen Englannissa on rakennettu lukuisia kävelysilloja FRP-tuotteiden avulla. (1, s. 14.)



Kuva 15. Kuvassa on Fidgett kävelysilta Englannissa (1, s. 14.)

Esimerkki Kanadasta

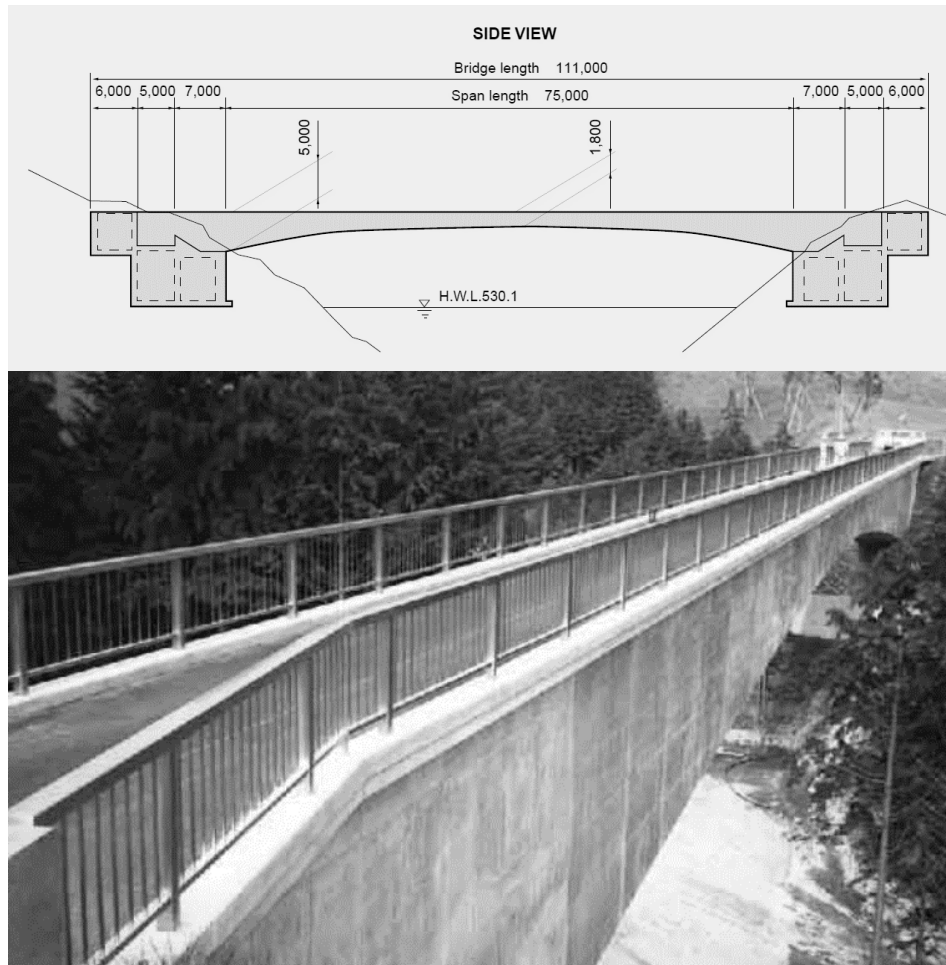
Länsimaista Kanada on tiennäyttäjä komposiittitankojen käytössä. Kanadassa on yksi vanhimpia siltoja, jossa on käytetty FRP-punoksia. Kanadan Calgaryyn valmistunut Beddingtonin silta rakennettiin vuonna 1993. Sillassa on käytetty jännitetyjä hiilikuitupunoksia elementtipalkeissa. (1, s. 14.)



Kuva 16. Beddington silta Calgaryssa Kanadassa. (22.)

Esimerkki Japanista

Japanissa on rakennettu paljon erilaisia siltoja käyttämällä FRP-tankoja ja punoksia. Kuvassa 17. on esitetty japanilainen yksiaukkoinen maantiesilta, jossa on käytetty FRP-jäniteitä. Hishon silta on pisin silta, jossa on käytetty FRP-jäniteitä. Sillan kokonaispituus on 110 metriä ja suurimman aukon jänneväli on 75 metriä. Japanissa on myös rakennettu useita kävelysiltoja, joissa on käytetty komposiittitankoja. (1, s. 15.)



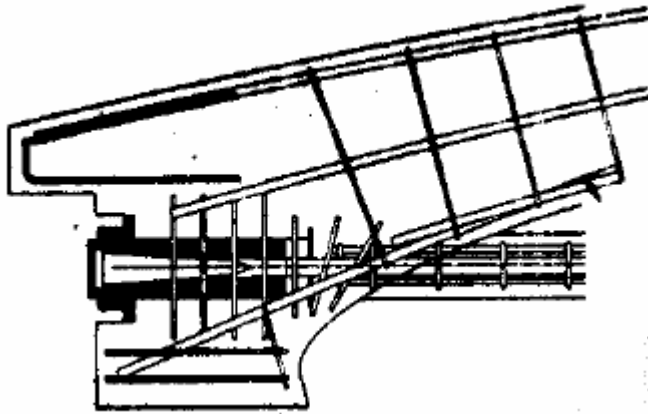
Kuva 17. Pituusleikkauskuva sekä valokuva Hishon sillasta Japanissa. Silta on jännitetty FRP-jäniteilla teräsjäniteiden sijaan. Kuvasta huomataan, että ulkomailta FRP-tuotteita on käytetty suurissakin silloissa. (23.)

Esimerkki Norjasta

Oppegårdin kävelysilta Oslossa on rakennettu vuonna 1996. Jänneväliltään 10 metriä pitkä silta on rakennettu kestäväksi myös traktorin paino. Pääraudoitteiden asemasta sillassa on käytetty lasikuitujäniteitä. Sillassa on jännitettyt palkit, jotka on instrumentoitu siten, että niiden käyttäytymistä voidaan seurata jatkuvasti. Kuvassa 18. on esitetty Oppegårdin sillan jännepunosten ankkurointi. (1, s. 17, 18.)

Norjalaiset ovat todenneet, että käytettäessä FRP-tankoja terästankojen sijaan pienissä yksiaukkoisissa silloissa, voitaisiin siltakannen erillinen vedeneristys jättää pois.

Vedeneristyksestä luopumisesta tulisi kustannussäästöjä, jotka edistäisivät FRP-tankojen käytön taloudellisuutta. (1, s. 18.)



Kuva 18. Kuvassa on esitetty Opegårdin silta ja sillan jännepunosten ankkurointi. (1, s. 17, 18.)

Esimerkki USA:sta

USA on myös edelläkävijä FRP-materiaalien käytössä ja USA:ssa on jo toteutettu useita siltoja FRP-tangoilla ja -punoksilla. USA:ssa on rakennettu silta, joka on valmistettu FRP-komposiitista. Sillan materiaaleja ovat lasikuitukankaat, hartsi, polymeeribetoni sekä tavanomainen betoni ja epoksinnoitetut terästangot (laatan kannessa). Silta on yksi tarkimmin valvottuja ja tutkittuja FRP-siltoja. Kyseinen silta ylittää Bennets Creekin joen New Yorkin osavaltiossa valtatiellä 248 ja se valmistui vuonna 1999. (1, s. 18.)

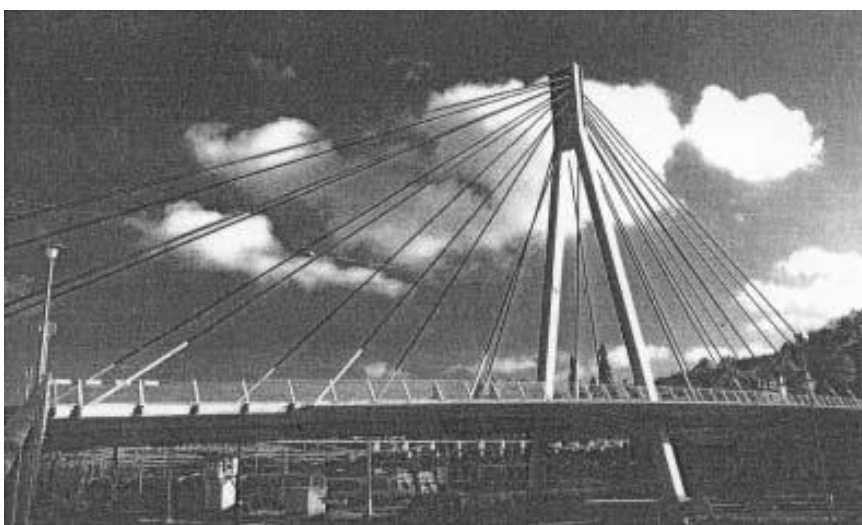
Vuonna 2004 USA:n Indianassa rakennetun Thayerin sillan raudotteina on käytetty FRP-tankoja (kuva 19.).



Kuva 19. Kuvassa on Thayerin silta USA:ssa (24, s. 4.)

Esimerkki Sveitsistä

Sveitsissä on ensimmäisenä maailmassa rakennettu vinoköysisilta, jonka vinoköysinä käytettiin hiilikuitukaapeleita. Storchenbruckin silta sijaitsee Sveitsin Winterthurissa. Sillan 24 vinoköydestä kahdessa käytettiin hiilikuitukaapeleita vuonna 1997. Kuvassa 20. on esitetty Storchenbruckin silta.



Kuva 20. Storchenbruckin vinoköysisilta Sveitsissä. (1,s. 20.)

6 Käyttökohteet siltarakentamisessa

FRP-tankojen ja muiden FRP-tuotteiden käyttökohteita siltarakentamisessa löytyy sekä uudisrakentamisen, että korjausrakentamisen puolelta. Uudisrakentamiseen FRP-tuotteita on käytetty ympäri maailmaa koesilloissa sekä suurissa maantie- ja kävelysilloissa jo yli 30 vuoden ajan (3, s.62). Suomessa FRP-tuotteita on käytetty siltarakentamisessa vain betonirakenteiden vahvistamiseen, joka luokitellaan korjausrakentamiseksi. Betonirakenteiden vahvistamisessa liimataan yleensä FRP-kangasta tai -levyjä betonirakenteen vetopuolelle, jolloin betonirakenteen kantavuus kasvaa. (1, s. 1.)

6.1 Uudisrakentaminen

FRP-tangoilla on uudisrakentamisessa hyvin suuri käyttöpotentiaali. FRP-tankojen pitkä suunnittelukäyttöikä sekä ruostumattomuus tekevät niistä ominaisuuksiensa puolesta ylivoimaisia materiaaleja verrattuna terästankoihin. FRP-tankojen kovin kilpailija uudisrakentamisen sekä korjausrakentamisen puolella on ruostumaton teräs, joka on kuitenkin materiaalikustannuksiltaan kalliimpaa kuin FRP-tangot (1, s.1.) FRP-tangoilla on kuitenkin huonoja ominaisuuksia, kuten FRP-tangoilla raudoitetun betonirakenteen taipumus haurasurtoon pienen murtovenymän takia (1, s.8). Edellä mainittu ja muut FRP-tankojen huonot ominaisuudet pystytään välttämään lähes kokonaan hyvällä rakenteiden suunnittelulla sekä huolellisella FRP-tankojen käsittelyllä ja varastoinnilla. (18.)

FRP-tankoja voitaisiin uudisrakentamisessa käyttää korvaamaan kaikki sillan teräsraudoitteet. Siltojen jännepunoksia ei ole kustannustehokasta korvata FRP-punoksilla. Kustannusnäkökulmasta FRP-tangoilla kannattaisi korvata vain ne teräsraudoitteet, joihin kohdistuu suurin kloridirasitus. (1, s.26.) Silloissa suurin kloridirasitus kohdistuu yleensä reunapalkkeihin (1, s.9). Reunapalkki ei ole sillan kantava rakenne, joten siihen ei kohdistu yhtä suuria kantavuusvaatimuksia kuin sillan kantaviin rakenteisiin. FRP-tankojen haurasmurtumavaaran takia FRP-tankoja olisi hyvä ensin käyttää vain rakenteissa, jotka eivät ole kantavia rakenteita ja joihin kohdistuu suuri kloridirasitus, kuten reunapalkkeihin. (18.)

6.2 Korjausrakentaminen

Betonin rapautuminen on yleisin syy sillan reunapalkkien sekä pilarien korjaamiseen. Rapautumiseen on useita syitä, mutta yleensä rapautuminen johtuu siitä, että vesi pääsee betonin huokosiin ja jäätyessään irrottaa betonin pintaa kerros kerrallaan. Maanteiden suolaus nopeuttaa vaurioita jäätymissulamiskertojen lisääntyessä. Kun teräsraudoitusta suojaava betonipeite on rapautunut sen verran, että raudoitus on havaittavissa, pahenee vaurio nopeasti teräskorroosion vaikutuksesta. Raudoituksen korrosio voi alkaa nopeamminkin, jos betonin halkeamien kautta raudoitukseen tunkeutuu klorideja, jotka ruostuttavat raudoitusteräket nopeasti. (17, s. 1.)

Betonin halkeamat voivat myös johtua rakennusvirheistä. Reunapalkki saattaa lohjeta, jos esimerkiksi kaidepylvään juureen jääneeseen onkaloon pääsee vettä, joka jäätyessään murtaa betonin. Betonin sisään jääneet puuvälkkeet aiheuttavat myös samankaltaisia betonin halkeamia. (17, s. 1.)

Teräsbetonista valmistetut reunapalkit kestävät yleensä 30–35 vuotta ennen kuin ne täytyy peruskorjata. Peruskorjaaminen on kallista ja aikaa vievää. FRP-tangot voidaan liittää yhteen terästankojen kanssa, joten FRP-tangot sopivat myös käytettäväksi siltojen korjauksissa, joissa FRP-tankojen tartunnat tulevat vanhoista teräksistä. Esimerkiksi reunapalkit saatetaan joutua korjaamaan kaksi kertaa sillan elinkaaren aikana. Jos korjauksessa käytettäisiin FRP-tankoja terästankojen sijaan, välttyttäisiin toiselta reunapalkin korjaukselta. FRP-tankojen käyttämisestä siltojen korjausrakentamisessa ei ole vielä juurikaan kokemusta Suomessa. Pitäisi selvittää, että onko FRP-tankojen käyttäminen korjausrakentamisessa kustannustehokasta ja sen myötä kannattavaa. (18.)

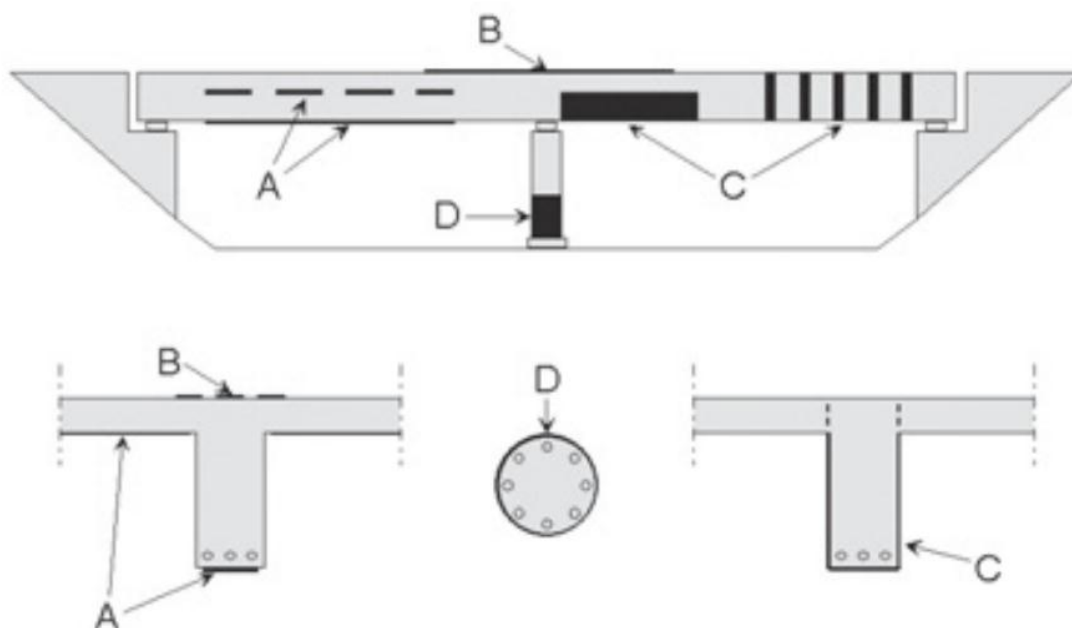
6.3 Käyttö betonirakenteen vahventamisessa

Olemassa olevien rakenteiden korjaus- ja vahvistamistarve on selvästi lisääntynyt viimeaikoina. Korjaus- ja vahvistamistarpeet johtuvat joko rakenteiden heikentyneistä ominaisuuksista tai rakenteille asetetuista uusista vaatimuksista. Uudet vaatimukset liittyvät yleensä rakenteiden kantokykyyn, kestävyYTEEN, käyttötarkoitukseen tai esteettisyyteen. (10, s. 12.)

On olemassa ainakin kaksi hyvää perustetta olemassa olevien rakenteiden vahvistamiseen. Jo olemassa olevien rakenteiden vahvistaminen on yleensä halvempaa kuin rakenteiden purkaminen ja uuden korvaavan rakenteen rakentaminen. Toinen hyvä peruste vahvistamiselle on vahvistamisen nopeus verrattuna uuden rakenteen rakentamiseen. Myös ympäristönäkökulmat puoltavat rakenteiden ominaisuuksien parantamista uudisrakentamisen sijasta. (10, s. 12.)

Noin 20 vuotta sitten alettiin kehittää liimattavia ei-metallisia hiilikuitu- tai lasikuitupohjaisia lujitteita betonirakenteiden (laatat, palkit ja pilarit) vahvistamiseen. Suomessa tehtiin ensimmäinen betonisillan vahventaminen hiilikuidulla vuonna 1998. Tämän jälkeen useita siltoja on vahvistettu liimattavilla komposiittilujitteilla. Vastaavia liimattavia komposiittilujitteita on käytetty betonirakenteiden vahventamisessa myös talonrakentamisessa. (1, s. 6.)

Entinen Tiehallinto eli nykyinen Liikennevirasto valmisteli vuonna 2005 suunnitteluohjeen betonisiltojen vahvistamismenetelmiä varten (1, s.6). Suunnitteluohje ”Betonirakenteiden liimausvahventamisohjeet” on tarkoitettu suunnittelu- ja työohjeeksi käytettäessä teräslevyjä tai hiilikuitumateriaalia siltojen betonirakenteiden vahventamisessa. Ohjeessa on esitetty laatuvaatimuksia koskien vahvennettavan rakenteen kuntoa, vahventamisen suunnitteluperusteita sekä materiaalin ja vahventamistyön laadunvarmistusta. (25, s. 6.)



Kuva 21. Kuvassa on esitetty betonisillan liimausvahventamistapoja ja kohteita (A taivutuksen suhteen kentässä ja B välituella, C leikkauksen suhteen kentässä ja D pilarin vahventaminen). (25, s. 10.)

Betonirakenteiden vahventamiseen käytetään yleensä hiilikuitumateriaaleja, koska hiilikuitujen mekaaniset ominaisuudet sopivat hyvin rakenteiden vahventamiseen. Lisäksi hiilikuitumateriaalien hyviä kestävyysominaisuuksia voidaan hyödyntää kaikenlaisissa rakennusympäristöissä. (10, s. 13.)

Hiilikuitumateriaalit ovat yleensä hiilikuitulevyjä, -nauhaa tai -kangasta (1, s. 7). Vahventamisessa käytetyt hiilikuitunauhat ovat yleensä leveydeltään 50–150 mm ja paksuudeltaan 1,0–1,5 mm. Käytetyt kankaat ja nauhat ovat ohuita, mutta niitä voidaan liimata useita päällekkäin jos se on tarpeen tarvittavan kantavuuden varmistamiseksi. Hiilikuiduilla on korkea lujuus vain kuitujen suunnassa. Jos vahventamista tarvitaan kahdessa suunnassa, on käytettävä joko kuituja kahdessa suunnassa sisältävää kangasta tai liimattava yhdensuuntaisia kuituja sisältäviä nauhoja ristiin. (25, s. 17.)

Ruostumattomat hiilikuituvahvikkeet liimataan betonirakenteen vetorasituksen puolelle vahvalla epoksiliimalla (1, s. 7). Liimattavat pinnat esikäsitellään ennen liimaustyötä liiman tartunnan takaamiseksi. Suunnitteluohjetta noudattamalla betonirakenteiden vahventamisille pyritään takaamaan noin 30–35 vuoden käyttöikä. (25, s. 12.)

7 FRP-tankojen käytön taloudellisuus

FRP-tangot eli komposiittitangot ovat materiaalikustannuksiltaan kalliimpia kuin harjaterästangot. FRP-tangot ovat kuitenkin halvempia kuin ruostumattomasta teräksestä valmistetut raudoitteet. Sekä talonrakentamisessa, että siltarakentamisessa FRP-tangon kilpailija on ruostumattomasta teräksestä valmistettu tanko. (1, s. 12.)

Edullisin FRP-tanko on lasikuitutanko. Lasikuitutangon hinta on noin 3-kertainen verrattuna tavallisen terästangon hintaan. Hiilikuitutanko on noin 15 kertaa kalliimpi kuin saman kokoinen terästanko. Kun otetaan huomioon hiilikuitutangon suurempi vetolujuus (2,5-5 kertaa teräksen lujuus), paranee hiilikuitutangon kilpailukyky oleellisesti ollen lähes samaa suuruusluokkaa kuin lasikuitutangolla. (1, s. 12.)

FRP-tankojen kilpailukyky materiaalikustannusten kannalta on hyvä ruostumattomaan teräkseen nähden kun otetaan huomioon eri materiaalien lujuudet. FRP-tankojen käytön taloudellisuuslaskelmissa (elinkaarikustannukset) otetaan huomioon rakenteen suunnittelukäyttöään mukainen elinkaari. Komposiittitankojen käytön taloudellisuutta arvioitaessa täytyy ottaa huomioon muun muassa seuraavat edut, jotka kompensoivat komposiittitankojen korkeita materiaalikustannuksia. (1, s. 12.)

1. Komposiittitangoilla on hyvät korroosionkesto-ominaisuudet, jotka vähentävät huolto- ja korjaustarvetta ja pidentävät rakenteen käyttöikä.
2. FRP-tankojen keveys keventää rakennetta.
3. FRP-tankojen keveys helpottaa tankojen käsittelyä. Kuljetuskustannuksissa säästetään myös, koska FRP-tankoja voidaan kuljettaa suurempia määriä kerralla kuin teräsraudoitteita.



Kuva 22. FRP-tankoja pystytään kuljettamaan suuriakin määriä kohtalaisen pienellä kuljetuskalustolla FRP-tankojen pienen massan takia. (21.)

4. Betonin karbonatisoituminen ei aiheuta korroosiota FRP-tankoihin.
5. Betonipeitteen paksuutta on mahdollista pienentää, jolloin rakenteen dimensiot pienenevät. Tällöin betonin materiaalikustannuksissa säästetään ja rakenne kevenee. Rakenteen pienempien dimensioiden takia saavutetaan myös tilan säästöä.
6. Komposiittitangot eivät johda lämpöä, joten ne eivät toimi kylmäsiltoina, jolloin säästetään energiakustannuksissa (talonrakennus).
7. Magneettikentät eivät vaikuta komposiittitankoihin.
8. Lasikuitutangot eivät johda sähköä.

Näiden edellä mainittujen etujen taloudellinen merkitys on arvioitava sovelluskohtaisesti. Kustannuslaskelmiin on otettava huomioon FRP-tuotteista mahdollisesti aiheutuvat lisäkustannukset, joita aiheutuu muun muassa työmenetelmistä sekä varastoinnista. (1, s. 12.)

Contesta Oy on tehnyt vuonna 2005 kustannuslaskelman, jossa eri FRP-tankoja on verrattu perinteisiin teräsraudoitteisiin sekä ruostumattomiin teräsraudoitteisiin. Kustannukset laskettiin sillan koko elinkaaren ajalta. Laskelmissa tarkasteltiin myös sellaista teoreettista vaihtoehtoa, jossa sillan laatan vesieristyksestä luovuttiin, kun käytettiin FRP-tankoja teräsraudoitteiden sijaan. Kustannuslaskelman esimerkkisiltana toimi Tampereen läntiselle kehätielle vuonna 2004 rakennettu Leppäkorven risteyssilta. (1, s.26, 27.)

Elinkaarikustannuslaskelmien lähtötietoina käytettiin seuraavia lukuarvoja:

- Sillalla oleva liikennemäärä: 5000 ajoneuvoa/vrk
- Suunnittelukäyttöikä 100 vuotta

Esimerkkisillan elinkaarikustannuslaskelmiin otettiin huomioon vain ne tekijät, joissa syntyi kyseisessä vertailussa oleellista eroa. Contestan tekemän tutkimuksen tulokset esittävät elinkaarikustannusten erot ja eri vaihtoehtojen paremmuusjärjestyksen. Esimerkkisillan hintatiedot ja peruskorjausten kustannusarviot ovat peräisin Finnmap Consulting Oy:n siltasuunnittelusta ja ylläpitokustannusarvio on peräisin Tiehallinnon asiantuntijalta. (1, s.26, 27.)

Contestan tutkimuksessa tehtiin seuraavat vertailut:

- Vertailu sillan reunapalkkien osalta, jossa oli myös mukana ruostumaton teräs.
- Vertailu koko sillan osalta, kun teräkset korvataan FRP-tangoilla.
- Vertailu koko sillan osalta, kun teräkset korvataan FRP-tangoilla ja kannen vedeneriste jätetään pois.

Tutkimuksessa oli oletuksena, että käytettäessä FRP-tankoja terästankojen sijaan pienenevät ylläpito- ja peruskorjauskustannukset oleellisesti. Tutkimuksen lujuuslaskelmissa käytettiin lasikuitutangon vetolujuutena 1,5 kertaa terästangon vetolujuutta ja hiilikuitutangolle 2,5 kertaa terästangon vetolujuus. (1, s.26, 27.)

Tutkimuksen mukaan lasikuitutanko on elinkaarikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto käytettäväksi reunapalkeissa. Esimerkiksi peruskorjauskustannuksissa on eroa koko sillassa noin 70 000 € FRP-tankojen hyväksi verrattuna perinteiseen terästankoon. Ruostumaton teräs on yhtä edullinen peruskorjauskustannuksiltaan kuin FRP-tangot, mutta ruostumaton teräs on Contestan tutkimuksen mukaan noin 7 kertaa kalliimpaa materiaalikustannuksiltaan kuin lasikuitutanko. Toiseksi edullisin vaihtoehto on hiilikuitutankojen käyttäminen reunapalkissa. Hiilikuitutangoilla elinkaarikustannukset olisivat noin 45 % kalliimmat kuin lasikuitutangoilla. Ruostumaton teräs on kolmanneksi edullisin (noin 80 % kalliimpi kuin lasikuitutanko) ja terästanko on kaikkein kallein (noin 170 % kalliimpi kuin lasikuitutanko). Taulukossa 4. on esitetty eri materiaaleista valmistettujen tankojen käytön kustannuserot. (1, s.26, 27.)

Jos koko sillan terästangot korvataan FRP-tangoilla, on lasikuitu halvin materiaali ja teräs on toiseksi halvin materiaali. Hiilikuitu on tässä tapauksessa kallein materiaali. Tutkimuksessa oli laskettu myös elinkaarikustannukset sille teoreettiselle tapaukselle, että kannen vesieriste jätettäisiin pois käytettäessä FRP-tankoja. Lasikuitutangot ovat siinäkin tapauksessa edullisimpia tankoja käytettäväksi betonissa. Lasikuitutangot olisivat tutkimuksen mukaan noin 160 % halvempia, kuin terästangot elinkaarikustannuksiltaan. Hiilikuitutangot olisivat tässä tapauksessa kalleimmat tangot (noin 260 % lasikuitutankoja kalliimmat). (1, s. 26, 27.)

Taulukko 4. Taulukossa on esitetty Leppäkorven risteyssillan elinkaarikustannusten vertailu eri materiaaleista valmistettujen tankojen välillä. (1, s. 26, 27.)

Raudoite- tangon ma- teriaali	Reunapalkin teräs- raudoitteiden kor- vaaminen	Koko sillan raudoit- teiden korvaaminen	Koko sillan raudoittei- den korvaaminen. Ei vesieristettä.
Lasikuitu	Halvin	Halvin	Halvin
Hiilikuitu	+45 %	+135 %	+265 %
Ruostuma- ton teräs	+84 %	Ei mukana laskemis- sa	Ei mukana laskemis- sa
Teräs	+175 %	+30 %	+165 %

8 Pohdintaa

Tässä insinööriyössä tutkittiin FRP-tuotteita eli kuitulujitteisia polymeerejä, joista voidaan valmistaa tankoja ja muita tuotteita. Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää FRP-tankojen sopivuutta siltarakenteisiin.

Insinööriyössä tuli ilmi, että FRP-tankojen yleisin murtuma on haurasmurtuma. Tämän takia FRP-tankoja kannattaisi mielestäni ainakin aluksi käyttää vain sellaisissa siltarakenteissa, jotka eivät ole kantavia rakenteita. Reunapalkit eivät ole kantavia rakenteita ja niissä on ongelmia, jotka aiheutuvat teräsraudoitteiden korroosiosta. FRP-tangot sopisivat ominaisuuksiensa puolesta hyvin käytettäviksi reunapalkeissa, koska niissä FRP-tankojen hyvät puolet tulisivat paremmin esille kuin niiden huonot puolet. Reunapalkeissa FRP-tangoilla voitaisiin korvata esimerkiksi vain ulommaiset teräsraudoitteet.

Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää FRP-tankojen taivutusominaisuudet reunapalkkien hakaraudoitteiden osalta, mutta asiaan ei saatu täyttä varmuutta. Ongelmana hakaraudoitteiden osalta on se, että reunapalkkien hakaraudoitteiden mittatoleranssit ovat pienet ja FRP-tankoja ei voida taivuttaa työmaalla. Toisin sanoen FRP-tangot täytyy toimittaa työmaalle valmiiksi taivutettuina ja mitat varmistettuina, jotta vältetään ongelmilta. FRP-tankoja voidaan lyhentää työmaalla ongelmitta metallisahalla tai katkaisulakalla. Hakaraudoitteiden mittavirheiden mahdollisuus voidaan estää tarkalla laadunvalvonnalla FRP-tankoja valmistavalla tehtaalla sekä FRP-tankojen toimitusten valvonnalla.

Ongelmana on myös FRP-tankojen lujuushäviö taivutuksissa. Lujuushäviö riippuu tangon taivutuskulmasta. Taivutetut FRP-tangot ovat myös kalliimpia kuin suorat tangot. Jatkotutkimuksissa on selvitettävä FRP-tankojen tarkat taivutusominaisuudet. Edellä mainitut FRP-tankojen taivuttamiseen liittyvät ongelmat on ratkaistavissa ja ne on hyvä ottaa huomioon FRP-tankoja käytettäessä, jotta vältetään ikäviltä yllätyksiltä rakennusvaiheessa.

FRP-tankojen vetolujuudet ovat reilusti suurempia kuin terästankojen vetolujuudet. Insinööriyön tutkimuksessa tuli esille, että eri raaka-aineista valmistettuja FRP-tankoja on olemassa paljon. Jokaisella eri valmistajan tangolla on hieman erilaiset ominaisuudet, jotka riippuvat käytetyistä raaka-aineista. FRP-tankojen käyttöä suunniteltaessa

täytyy siis varmistaa käytettävien FRP-tuotteiden tarkat ominaisuudet, jotta rakenteiden suunnittelu tulee tehtyä oikeilla lujuusarvoilla. FRP-tuotteiden valmistajalta täytyy myös varmistaa kyseisen tuotteen muut ominaisuudet, jotka riippuvat esimerkiksi käytetyistä lisäaineista.

FRP-tankojen paras puoli ja syy miksi FRP-tankoja käytetään on se, että ne eivät ruostu. Ruostumattomuudesta on suuri etu sellaisissa rakenteissa, joihin kohdistuu kloridirasitusta. Niihin kannattaisi asentaa FRP-tangot reunimmaisiksi/uloimmaisiksi tangoiksi, jolloin ruostumattomuudesta saataisiin suurin etu ilman, että rakenteen materiaalikustannukset kasvaisivat merkittävästi.

Suomessa pitäisi laatia FRP-tankojen suunnittelua ja käyttöä varten ohjeet, jotta FRP-tankoja voitaisiin käyttää silloissa ja muissa rakenteissa. Näiden ohjeiden puuttuminen on tällä hetkellä FRP-tankojen käyttöönoton esteenä. Ulkomailta löytyy paikallisia suunnitteluohjeita, joita voitaisiin muokata Suomen olosuhteisiin sopiviksi. FRP-tankoja voitaisiin käyttää koesillassa, jolloin saataisiin lisää tietoa FRP-tankojen sopivuudesta Suomen olosuhteisiin.

9 Yhteenveto

Betonirakenteiden rappeutuminen ja vaurioituminen haastavissa olosuhteissa aiheuttaa suuria korjauskustannuksia, joilta voitaisiin ainakin osittain välttyä käyttämällä betonissa sellaisia vetotankoja, jotka eivät ruostu. Kaikissa ruostumattomissa materiaaleissa on omat ongelmansa, mutta FRP-tuotteissa tuotteiden hyvät ja huonot ominaisuudet ovat hyvin tasapainossa ja suurin osa FRP-tuotteiden huonoista puolista on ratkaistavissa laadukkaalla suunnittelulla sekä käytännön järjestelyillä.

Suurin ongelma FRP-tankojen käyttöönoton esteenä on tällä hetkellä se, että FRP-tuotteille ei ole olemassa suomalaisia suunnitteluohjeita, eikä voida olla täysin varmoja FRP-tuotteiden pitkäaikaiskestävyydestä siltarakenteissa, koska kokemukseräistä tietoa on vasta noin 30 vuoden ajalta. FRP-lasikuitutankojen on todettu olevan kustannustehokkaita siltarakentamisessa silloin kun niille suunnitellaan 100 vuoden käyttöikä.

Alla on listattuna yhteenvedoksi FRP-tankojen käytön hyödyt (+) ja haitat (–):

- + FRP-tangoilla on hyvät vetolujuusominaisuudet harjateräkseen verrattuna (harjateräs noin 0,6 GPa, hiilikuitutangon suunnittelulujuuden takuuarvo 1,6 GPa).
- + FRP-tuotteet ovat kevyitä (teräs noin 7800 kg/m³, FRP noin 1500–2500 kg/m³).
- + FRP-tangot eivät ruostu.
- + FRP-tuotteet kestävät kloridirasitusta ja muita kemiallisia aineita.
- + FRP-tuotteet eivät johda sähköä (paitsi hiilikudusta valmistetut tuotteet) tai lämpöä.
- + FRP-tuotteilla on pituussuunnassa samankaltaiset lämpölaajenemisominaisuudet kuin betonilla.

- + Lasikuidulla on pienempi kimmokerroin kuin teräksellä (+ elastisuus, – betonin halkeilu).
- + Lasikuitutangot ovat Contestan tutkimuksen mukaan elinkaarikustannuksiltaan edullisempia käytettäviksi sillan reunapalkeissa sekä koko sillassa kuin terästangot.
- + Ei tarvetta jatkoksille jos käytetään rullatavaraa, josta voidaan leikata määrättyjä tankoja.
- + FRP-tankoja voidaan liittää yhteen terästankojen kanssa. FRP-tankoja ja terästankoja voidaan käyttää samassa rakenteessa.
- + FRP-tankoja käytettäessä betonipinnan suojaetäisyydet eivät ole yhtä merkittäviä kuin terästankojen käytettäessä. Suojaetäisyyden täytyy kuitenkin olla riittävä, jotta betonipinta ei halkeile ja tangolle saadaan riittävä tartunta.
- FRP-tangot ovat herkempiä esimerkiksi viilloille ja iskuille kuin terästangot, joten FRP-tankoja täytyy käsitellä huolellisemmin.
- FRP-tuotteet eivät kestä UV-valoa pitkiä aikoja.
- Suomalaisten suunnitteluohjeiden/mitoituspohjojen puuttuminen FRP-tangoille.
- FRP-tuotteista on osittain puutteellinen tietämys muun muassa pitkäaikaiskestävyydestä sekä kestävydestä suomalaisissa olosuhteissa.
- FRP-tuotteilla on huonommat palonkesto-ominaisuudet kuin teräksellä (ei suurta merkitystä siltarakentamisessa).
- FRP-tangoilla on erilaiset lämpölaajenemisominaisuudet poikittais- ja pituus-suunnassa. Poikittaissuunnassa FRP-tangoilla on kolminkertainen lämpölaajeneminen pituussuuntaan verrattuna. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että hartsilla on suurempi lämpölaajenemiskerroin kuin kuiduilla ja hartsit laajenee

poikittaissuunnassa, koska lujat kuidut estävät sitä laajenemasta pituussuunnassa.

- Haurasmurtumavaara betonirakenteissa.
- FRP-tankojen taivuttaminen ei onnistu työmaalla. FRP-tangot tilataan tehtaalta valmiiksi taivutettuina.
- FRP-tankojen lujuusominaisuudet heikkenevät taivutuksissa.
- Virhemarginaalit taivutuksissa.
- Pitkät toimitusajat, koska tehtaot ovat ulkomailla. Korostaa työmaalla tapahtuvan toimitusten tarkastamisen tärkeyttä. Etenkin taivutettujen tankojen mitat täytyy tarkastaa työmaalla hyvissä ajoin.
- FRP-tangot ovat materiaalikustannuksiltaan kalliimpia kuin terästangot.

Tämän insinööriyön tutkimuksen pohjalta voidaan todeta, että FRP-tangot soveltuvat käytettäviksi siltarakentamisessa. FRP-tankoja käytettäessä täytyy kuitenkin huomioida FRP-tankojen huonot puolet, jotka aiheuttavat ongelmia jos niitä ei oteta huomioon. Tämän tutkimuksen mukaan FRP-tankojen käytöstä saatavat hyödyt olisivat suuremmat kuin FRP-tankojen käytöstä aiheutuvat haitat. FRP-tankojen käytöstä saataisiin Contesta Oy:n tekemien elinkaarikustannuslaskelmien mukaan kustannussäästöjä vähentyneiden ylläpito- ja korjauskustannusten muodossa.

Jatkotutkimuksille on vielä tarvetta. Etenkin FRP-tankojen taivutusominaisuuksia ja pitkäaikaiskestävyyttä Suomen oloissa täytyy vielä tutkia esimerkiksi koesillan muodossa. Jatkotutkimukset olisi hyvä aloittaa mahdollisimman pian, jotta Suomestakin saadaan tietoa FRP-tankojen kestävydestä.

Lähteet

- 1 Ratvio, Juha. 21.4.2005. Siltojen raudoitteiden korvaaminen ei-metallisilla tangoilla ja punoksilla. Tutkimusselostus A-5552. Contesta Oy.
- 2 Honkavuori Raimo & Lampinen Lasse. 2005. Betonitekniikan oppikirja 2004 by 201. Suomen betoniyhdistys.
- 3 Potyrala, Pawel Bernard. 2011. Use of Fiber Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures. Universitat politecnica de catalynua.
- 4 <<http://www.destia.fi/fi/yritys.html>> Luettu 13.3.2013
- 5 <http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_5.php> Luettu 29.1.2014
- 6 <http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_5_1.php> Luettu 29.1.2014
- 7 Kustannusosakeyhtiö Otava. Kuitutietoa.
<http://www.avoki.fi/pukeutumisen/pukeutumisesta_poweria/unisex/print/unisex_kuitutietoa.pdf> Luettu 29.1.2013
- 8 Demers, Marc & Neale, Kenneth W. & Sheikh, Shamim. 2008. FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures. Design manual No. 4. ISIS Canada Research Network.
- 9 <<http://www.muoviteollisuus.fi/fin/muovitieto/sanasto/?ltr=12&tag=233> > Luettu 29.1.2014
- 10 Lonka, Joonas & Nissinen, Jesse. 2012. Teräsbetonipalkin vahvistaminen hiilikuitukomposiiteilla. Savonia AMK, Opinnäytetyö.
- 11 <<http://www.kevra.fi/fi/Tuotteet/Lujitteet/Lasikuitu/>> Luettu 15.2.2014
- 12 <<http://www.madehow.com/Volume-4/Carbon-Fiber.html#b>> Luettu 31.1.2014
- 13 Teknologiateollisuuden 100-vuotissäätiö. Oppimateriaali. Lujitemuovitekniikka eri toimialoilla.
<<https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/MAMK/MPDF/Lujitemuovitekniikka%20eri%20toimialoilla-1.pdf> > Luettu 29.1.2014
- 14 Oreshkin, Dimitriy. Toimitusjohtaja. TG Ekipage. Ukraina. Luentomateriaali Pow-erpoint, Composite Reinforcement of the concrete. 28.3.2014.

- 15 Task Group 9.3. 2007. FRP reinforcement in RC structures. Technical report prepared by a working party of Task group 9.3, FRP reinforcement for concrete structures.
- 16 Busel John P. & ACI Committee 440. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. ACI 440.1R-06. PDF.
- 17 Tiehallinto. 2008. Betonirakenteet, Reunapalkin uusiminen. Työkohtaiset laatuvaatimukset. 06/08 2.211.
<http://alk.tiehallinto.fi/sillat/silko/kansio2/s2211_08.pdf> Luettu 16.2.2014
- 18 Markku Savola. Kehittämispäällikkö. Destia. Turku. Puhelinkeskustelu. 29.3.2014.
- 19 Ratvio, Juha. 5.5 2006. Ei-metallisten tankojen pakkas-suolakestävyys. Alustavat kokeet. Contesta Oy.
- 20 <<http://bcontinent.com/fin/gallery.html>> Luettu 21.3.2014
- 21 <<http://www.brick-66.ru/production/armatura/stekloplastikovaia-armatura/>> Luettu 21.3.2014
- 22 <www.alberta.acieragf.com> Luettu 7.3.2014
- 23 <http://www.acc-club.jp/english/pdf/3_1_1.pdf> Luettu 7.3.2014
- 24 V-Rod, PDF. Bridges using V-ROD FRP rebars from Pultrall Inc. <www.pultrall.com>. Luettu 20.3.2014
- 25 Tiehallinto. 2007. Betonirakenteiden liimausvahventamisohjeet. Suunnittelu- ja toteutusvaiheen ohjaus. <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/bet_liimaus.pdf> Luettu 16.2.2014