



MANNVIT



RANNSÓKNARSKÝRSLA

BREIKKUN VEGBRÚA MEÐ FRP

VEGAGERÐIN

BREIKKUN VEGBRÚA FYRIR UMFERÐ GANGANDI OG
HJÓLANDI MEÐ TREFJASTYRKTUM FJÖLLIÐUM (FRP)

Efnisyfirlit:

1. Inngangur	1
2. Almennt um trefjastyrktar fjölliður (FRP).....	2
3. Staðlar og leiðbeiningar	5
4. Kostnaður	7
5. Byggjanleiki	8
6. Ending	9
6.1 Hiti.....	9
6.2 Bruni.....	10
6.3 Frost/þíða.....	10
6.4 Raki og selta	10
6.5 Útfjólublá geislun	10
6.6 Alkali virkni.....	10
6.7 Raunveruleg dæmi	11
6.7.1 West Mill brúin	11
6.7.2 Fiberline brúin í Kolding.....	11
7. Burðarþolshönnun.....	12
7.1 Álagsforsendur	12
7.2 Efnisgæði.....	12
7.3 Tengingar	14
7.3.1 Almennt	14
7.3.2 Boltaðar tengingar.....	14
7.3.3 Límdar tengingar.....	15
7.3.4 Aðrar tengingar.....	15
7.4 Skrið (e. Creep).....	16
7.5 Þreyta (e. Fatigue).....	16
8. Samantekt	18
9. Heimildaskrá.....	19
Viðauki A – Laxá á Breið – Göngubrú úr stáli	20
Viðauki B – Laxá á Breið – Göngubrú úr FRP	22

1. Inngangur

Verkefnið „Breikkun vegbrúa fyrir umferð gangandi og hjólandi með trefjastyrktum fjölliðum (FRP)“ er unnið í samstarfi Vegagerðarinnar, Mannvits og Gnýs sf og er styrkt af Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar.

Tilgangur verkefnisins er að kanna möguleika á að breikka núverandi þjóðvegabrýr með FRP prófílum til að koma fyrir göngu- og hjólareinum.

Á síðustu árum hefur umferð gangandi og hjólandi vegfarenda á þjóðvegum landsins aukist, sérstaklega þar sem þjóðvegir liggja í þéttbýli og við vinsæla ferðamannastaði. Á sumum þessarra staða eru brýr sem ekki eru gerðar fyrir umferð gangandi og hjólandi vegfarenda og breidd þeirra er ekki nægileg til að hægt sé að koma fyrir göngu- og hjólarein. Þetta skapar óþægindi og hættu fyrir vegfarendur.

Þetta verkefni felst í að kanna möguleika á að breikka núverandi þjóðvegabrýr með burðarvirki úr trefjastyrktum fjölliðum (FRP) til að koma fyrir göngu- og hjólareinum. Trefjastyrktar fjölliður (FRP) hafa á síðustu árum þróast yfir í að vera raunhæfur valkostur fyrir burðarvirki göngubrúa. Helstu kostir FRP efnanna er hár styrkur, lítil eiginþyngd og gott efna og veðrunarþol.

Engar brýr hafa verið byggðar úr FRP á Íslandi en fjölmargar brýr hafa verið byggðar úr FRP erlendis, bæði göngubrýr og vegbrýr. Mynd 1 sýnir Fiberline brúna sem byggð var 1997 í Kolding í Danmörku. Brúin er eingöngu byggð úr FRP efnum.



Mynd 1: Fiberline brúin í Kolding í Danmörku

Þessi skýrsla byggir á heimildaöflun, forhönnun á FRP burðarvirki í samræmi við Eurocomp leiðbeiningar og upplýsingar frá Gný sf. og Fiberline í Danmörku. Fjallað er almennt um trefjastyrktar fjölliður (FRP), helstu staðla og hönnunarleiðbeiningar fyrir FRP, kostnað, byggjanleika og endingu burðarvirkja úr FRP efnum. Einnig er fjallað um helstu atriði sem þarf að hafa í huga við hönnun burðarvirkja úr FRP efnum.

2. Almennt um trefjastyrktar fjölliður (FRP)

Trefjastyrktar fjölliður (e. Fiber Reinforced Polymers) verða hér eftir nefndar FRP í þessari skýrslu. FRP er búið til úr plastfjölliðum (e. Polymers) sem eru styrktar með trefjum (e. Fibers). Í þessari skýrslu verður eingöngu fjallað um FRP sem styrkt er með glertrefjum (e. Glass Fiber Reinforced Polymers) og framleitt með svokallaðri „samfelldri aðferð“ (e. Pultrusion).

Plastfjölliðurnar sem eru notaðar eru nokkurskonar límefti sem oft er kallað „resin“ eða „matrixa“. Límeftið umlykur trefjarnar, heldur þeim saman og ver trefjarnar fyrir utanaðkomandi áhrifum, t.d. raka, útfjólubláum geislum o.s.frv., ásamt því að færa krafta sem verka á límeftið yfir í trefjarnar. Algengast er að notast við polyester límefti við gerð FRP prófíla en það er tiltölulega ódýrt og hefur góða eiginleika til að verjast hitaáráun, höggum og útfjólubláu ljósi.

Algengast (og ódýrast) er að nota glertrefjar sem styrkingarefni. Glertrefjar hafa góðan tog- og þrýstistyrk og sýna línulega fjaðrandi hegðun undir álagi. Glertrefjar brotna án þess að fara í flot og brot í þeim er því stökkt. Þá er fjaðurstuðull glertrefja tiltölulega lágur miðað við styrk efnisins.

Til eru margar aðferðir við framleiðslu á FRP. Hér verður eingöngu fjallað um FRP prófíla sem framleiddir eru með svokallaðri „samfelldri framleiðslu“ (e. Pultrusion), en með þeirri tækni er almennt stangar- og bitaefni búið til. Langir samfelldir glertrefjapræðir eru lagðir í langstefnu prófíls sem verið er að búa til. Síðan er glertrefjamottum komið fyrir utanum þræðina til að auka skerstyrk og gatrandastyrk prófílsins. Glertrefjarnar eru svo dregnar í gegnum vætibað af polyester límeftum og formaðar í rétta mynd, t.d. rör, I prófíl, kassaprófíl o.s.frv.








FRP prófílar framleiddir með ofangreindri aðferð hafa verið notaðir í burðarvirki mannvirkja í rúm 40 ár. Vinsælast er að nota FRP prófíla í mannvirki þar sem umhverfisáreiti er mikið (t.d. í efnaverksmiðjum, kæliturnum og mannvirkjum í sjó), þar sem rafleiðni getur verið vandamál (t.d. í tölvugólfum) og þar sem þörf er á léttbyggðum mannvirkjum (t.d. göngubrýr utan alfaraleiða).

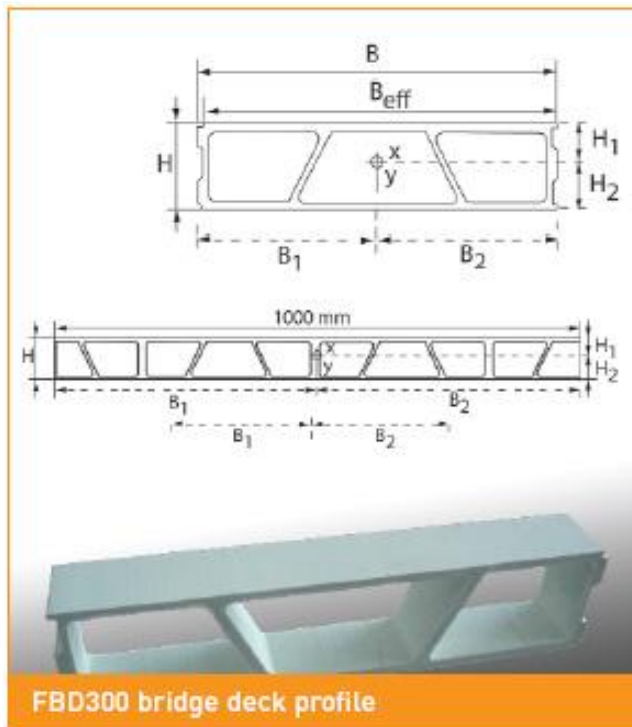
Dæmi um brýr byggðar úr FRP prófílum má sjá í Töflu 1.

Tafla 1: Dæmi um brýr byggðar úr FRP

Brú	Land	Ár	Lengd	Athugasemdir
Fiberline brúin í Kolding	Danmörk	1997	40 m	Fyrsta brúin í Skandinavíu gerð eingöngu úr FRP efnum. 13 tonn
Göngubrú í Lleida	Spánn	2001	38 m	Bogabrú. Eitt haf
Friedberg brúin	Þýskaland	2008	22 m	Brúargólf úr FRP ofan á stálbita
Göngubrú í Reinbek	Þýskaland	2009	100m	Brúargólf úr FRP ofan á stálbita
Vegbrú West Mill	England	2002	10m	Vegbrú eingöngu úr FRP

Nokkur fyrirtæki sérhæfa sig í framleiðslu á FRP prófílum. Tvö stærstu fyrirtækin í Evrópu eru Fiberline í Danmörku og Top Glass á Ítalíu. Á mynd 2 má sjá dæmi um FRP prófíla sem framleiddir eru af Fiberline. Mynd 3 sýnir FRP prófíl, einnig frá Fiberline, sem hugsaður er sem brúargólf. Hægt er að fá hvern prófíl í lengdum upp að 12m.

							
Name	Tubes	Flat - Profiles	Square Tubes	T - Profile	Angle	U / UL - Profile	I / IL - Profile
Dimensions [mm]	Ra = 37.5 / 45 T = 5	B = 30 - 1220 H = 6 - 12	H = 50 - 240 T = 5 - 12	H = 60 / 90 B = 60 / 72 T = 6 / 10	H = 50 - 150 B = 50 - 150 T = 6 - 12	H = 120 - 360 B = 60 - 180 T = 6 - 18	H = 120 - 360 B = 60 - 180 T = 6 - 18

Mynd 2: Dæmi um FRP prófíla

Mynd 3: Dæmi um brúargólf úr FRP

Helstu kostir og gallar FRP eru listaðir upp í Töflu 2.

Tafla 2: Kostir og gallar burðarvirkja úr FRP

Kostir	Gallar
Lágur eðlismassi	Lágur fjaðurstuðull
Hár tog- og þrýstistyrkur	Efniskostnaður
Tæringarþolið efni	Reynsluleysi hönnuða
Veðrunarþolið efni	Skortur á samræmdum hönnunarstöðlum
Efnaþolið efni	Lág brotstreita – stökkt brot
Þarfnast ekki yfirborðsmeðhöndlunar	Alkalívirkni glertrefja í sambandi við steypu

Kostir FRP prófíla umfram hefðbundin byggingarefni eru ótvíræðir í ákveðnum aðstæðum, t.d.:

- Á byggingarsvæði þar sem örðugt er um aðflutninga
- Þar sem umhverfisáreiti (saltáraun) er mikið
- Þar sem nauðsynlegt er að lágmarka þyngd burðarvirkis
- Þar sem byggingartími er takmarkaður, t.d. yfir þjóðveg

Til að auka slitþol og viðnám (hálkuvörn) brúargólfa úr FRP prófflum er nauðsynlegt að leggja slitlag á yfirborðið. Ýmist er notað malbik (e. asphalt), polymer steypa eða tveggja þátta epoxy slitlag. Nokkur slitlags kerfi sem byggja á polymer steypu, og voru upprunalega hönnuð fyrir hefðbundið steypu eða stálgólf, hafa verið notuð á FRP brúargólf.

Vegna þess að FRP prófílar sem notaðir eru í brúargólf hafa annan hitapanstuðul en efni í slitlaginu þarf að huga vel að hönnun slitlagsins svo ekki komi sprungur í það af völdum mismunastreitu. Þar að auki þarf að vanda vel yfirborðsmeðhöndlun FRP brúargólfs áður en slitlag er lagt á, til að forðast sprungumyndun eða aðskilnað milli þessara ólíku efna.

3. Staðlar og leiðbeiningar

Engir samræmdir evrópskir hönnunarstaðlar fyrir FRP prófíla eru til. Eini samræmdi evrópustaðallinn sem fjallar um FRP er ÍST EN 13706 og tók hann gildi sem íslenskur staðall árið 2003. ÍST EN 13706 fjallar um FRP prófíla sem ætlaðir eru til notkunar í burðarvirki og framleiddir eru með svokallaðri „samfelldri framleiðslu“ (e. Pultrusion). Staðallinn skilgreinir lágmarksákvæði fyrir gæði, viktörk, styrk og stífni og skiptist hann í þrjá hluta:

- ÍST EN 13706-1 Skilgreinir flokkunarkerfi fyrir FRP prófíla
- ÍST EN 13706-2 Skilgreinir almennar kröfur til framleiðslu FRP prófíla hvað viðkemur útliti, viktörkum, styrk og stífni. Þessi hluti skilgreinir einnig prófanir og gefur viðmiðunarreglur fyrir gæðaeftirlit
- ÍST EN 13706-3 Skilgreinir tvo styrkleikaflokka og lágmarks kröfur sem gerðar eru til efniseiginleika prófíla í hvorum flokki fyrir sig, sjá Mynd 4

	Property	Unit	Test method	Minimum Properties	
				E23 Grade	E17 Grade
1.1	Full section test	GPa	Annex D, EN 13706-2:2002	23	17
1.2	Tension modulus-axial	GPa	EN ISO 527-4	23	17
1.3	Tension modulus-transverse	GPa	EN ISO 527-4	7	5
1.4	Tension strength-axial	MPa	EN ISO 527-4	240	170
1.5	Tension strength-transverse	MPa	EN ISO 527-4	50	30
1.6	Pin-bearing strength-axial	MPa	Annex E, EN 13706-2:2002	150	90
1.7	Pin-bearing strength-transverse	MPa	Annex E, EN 13706-2:2002	70	50
1.8	Flexural strength – axial	MPa	EN ISO 14125	240	170
1.9	Flexural strength – transverse	MPa	EN ISO 14125	100	70
1.10	Interlaminar shear strength-axial	MPa	EN ISO 14130	25	15

Mynd 4: Lágmarkskröfur til styrkleikaflokka E23 og E17 í ÍST EN 13706-3

Eftir því sem næst verður komist eru til tvær almennar hönnunarleiddbeiningar fyrir FRP prófíla: Structural Plastics Design Manual (ASCE, 1984) og Eurocomp Design Code and Handbook (Eurocomp, 1996). Eins og sést eru þessi rit komin nokkuð til ára sinna og líklegt að þróunin í framleiðslu FRP prófíla hafi orðið þónokkur á þessum tíma.

Eurocomp Design Code and Handbook er notuð í Evrópu og byggir hún á hugmyndafræði um hlutstuðla líkt og evrópsku hönnunarstaðlarnir Eurocodes. Hana er því hægt að nota samhliða ÍST EN 1990 (Eurocode 0) og ÍST EN 1991 (Eurocode 1). Í Eurocomp handbókinni er einnig að finna sérstakar reglur fyrir boltaðar tengingar.

Stærsti framleiðandi FRP prófíla í Evrópu er Fiberline Composites A/S í Danmörku. Þeir hafa sett saman hönnunarleiddbeiningar (Fiberline Design Manual) sem byggja á Eurocomp handbókinni, Eurocodes og EN 13706. Fiberline handbókin fjallar meðal annars um val á efnisstuðlum, útreikninga á FRP prófílum

bæði í not- og brotmarkaástandi og útreikninga á boltuðum samtengingum. Í handbókinni er einnig að finna töflur með þversniðsstærðum prófíla, töflur með leyfilegum haflengdum og reiknuð dæmi.

Engar samræmdar eða staðlaðar þversniðsstærðir eru notaðar við framleiðslu FRP prófíla heldur hannar hver framleiðandi sínar eigin prófílstærðir. Breytileiki milli framleiðenda getur því verið nokkur og nauðsynlegt er að notast við tækniblöð frá framleiðendum við hönnun á mannvirkjum úr FRP prófílum.

Af ofangreindu er ljóst að ekki er jafn aðgengilegt að hanna mannvirki úr FRP efnum og úr timbri, steypu og stáli, bæði vegna skorts á samræmdum hönnunarstöðlum svo og skorti á samræmdum þversniðsstærðum. Með tilkomu nýrra staðla, og þá sérstaklega evrópskra hönnunarstaðla, má þó búast við að hönnuðir verði viljugri til að skoða kosti FRP efna þegar kemur að efnisvali í burðarvirki.

4. Kostnaður

Samkvæmt upplýsingum frá Fiberline er líklegt að efniskostnaður FRP brúa sé talsvert hærri en brúa úr stáli og timbri. Sá kostnaður vinnst hinsvegar að nokkru leyti upp á líftíma mannvirkisins vegna lægri viðhaldskostnaðar, t.d. viðhalds ryðvarna. Það er einnig líklegt að kostnaður við reisingu FRP brúa sé lægri en hefðbundinna brúa vegna þess hve miklu munar á þyngd FRP prófíla annarsvegar og hefðbundinna byggingarefna hinsvegar.

Til að fá verðhugmyndir eða tilboð í FRP prófíla frá Fiberline þarf endanleg hönnun, teikningar og efnislistar, að liggja fyrir. Fullnaðarhönnun á göngubrú úr FRP prófílum er hinsvegar utan við umfang þessa verkefnis og því ekki hægt að gera beinan kostnaðarsamanburð á þessu stigi. Mælt er með, að í framhaldi af þessu verkefni verði gerður kostnaðarsamanburður á brú úr FRP annarsvegar og stáli hinsvegar. Kostnaðargreiningin þyrfti að byggja á líftíma mannvirkisins (e. Life Cycle Cost).

Árið 2006 var gert lokaverkefni í byggingartæknifræði við Háskólann í Reykjavík þar sem núverandi göngubrú yfir Miklubraut, með burðarvirki úr stáli, var hönnuð úr FRP prófílum og reynt að bera saman kostnað við stálburðarvirki annarsvegar og burðarvirki úr FRP hinsvegar. Niðurstöður verkefnisins má sjá í töflu 3.

Tafla 3: Kostnaðarsamanburður frá 2006

	Stál	FRP
Efnisþyngd	53,1 tonn	18,5 tonn
Verð	677 kr/kg	2.180 kr/kg
Heildarkostnaður	35,9 milljónir ISK	40,3 milljónir ISK

Tekið skal fram ofangreind kostnaðargreining var grófáætluð og ekki byggð á tilboði eða verðhugmynd frá FRP framleiðanda. Þá var ekki tekið tillit til annarra mikilvægra hluta eins og byggingartíma, stöðvun umferðar á meðan uppsetning fer fram og stærðar undirstaða.

5. Byggjanleiki

Einn stærsti kostur FRP prófíla er hversu léttir þeir eru, mun léttari en stál og steypa. Hagræðing við uppsetningu er því ótvíræð, hún krefst minna vinnuafis og tækja og uppsetningartíminn er stuttur. Mannvirki úr FRP henta því sérstaklega vel þar sem aðgengi er erfitt eða þar sem óhægt er að koma stórum vinnuvélum að.

Sem dæmi um reisingartíma var Fiberline brúin í Kolding í Danmörku (40m löng stagbrú) reist á 3 næturvöktum, samtals á 18 tímum. West Mill brúin á Englandi (10m löng vegbrú) var sett saman á staðnum og reist á 7 dögum.

Annað dæmi þar sem kostir FRP prófíla eru ótvíræðir er Pontresina brúin í Sviss (sjá mynd 5). Hún er staðsett í svissnesku Ölpunum og var flutt á staðinn með þyrlu. Hún er tekin niður á hverju vori, einnig með þyrlu, vegna vorflóða.



Mynd 5: Pontresina brúin í svissnesku Ölpunum

6. Ending

Mikilvægt atriði þegar kemur að efnisvali burðarvirkja er þol gegn umhverfisáreiti. Áreiti á borð við hita, frost, raka, seltu, útfjólubláa geislun og bruna getur haft áhrif á efniseiginleika FRP prófíla. Hafa ber í huga að þetta einskorðast ekki við FRP efni, heldur á meira eða minna við um önnur hefðbundin byggingarefni svo sem stál, steypu og timbur.

Álag sem helst hefur áhrif á endingu, styrk, stífni og sprungumyndun í FRP er listað í töflu 4. Stuttlega verður fjallað um hvert og eitt hér á eftir.

Tafla 4: Umhverfisálag og áhrif þess á FRP prófíla

Áraun	Áhrif á FRP
Hiti	Lítill ef hiti er <60°C - Mikil við hærra hitastig
Bruni	Mikil áhrif við lágt hitastig >150°C
Frost/þíða	Lítill
Raki	Nokkur
Selta	Nokkur
UV geislun	Talsverð ef útsett fyrir sólarljósi
Alkali	Mikil ef í snertingu við steypu

Ýmsar prófanir og rannsóknir hafa verið framkvæmdar á rannsóknarstofum á endingu FRP prófíla. Það skortir hinsvegar staðlaðar prófunaraðferðir svo og frekari prófanir við raunverulegar aðstæður til að hægt sé að fullyrða almennt um endingu FRP prófíla.

Það þarf einnig að athuga að FRP prófílar hafa aðeins verið notaðir í burðarvirki í örfáa áratugi og því ekki komin nægileg almenn reynsla á endingu þeirra og þol gagnvart umhverfisáreiti.

6.1 Hiti

Þegar hiti í FRP prófílum fer yfir svokallaðan "heat distortion temperature" breytast efniseiginleikar þeirra, plastefnið mýkist og samvirgni plastefna og trefja minnkar. Misjafnt er eftir samsetningu FRP efnisins við hvaða hitastig þetta gerist, en getur verið á bilinu 65-120°C. Í venjulegri notkun við brúarsmíði á Íslandi ætti hitaþol FRP prófíla því ekki að valda vandræðum.

Í hönnunarhandbókinni „Fiberline Design Manual“ er kveðið á um að reikna skuli með lækkuðum styrk og stífni ef hitastig fer yfir 60°C. Lækkunarstuðullinn er 1,25 fyrir skammtíma álag en 3,13 fyrir langvarandi álag.

Þegar FRP prófílar eru notaðir við brúarsmíði þarf að taka tillit til hitastiguls milli efri og neðri brúnar brúardekks, líkt og fyrir önnur byggingarefni. Hitamunurinn getur valdið spennum sem verða ráðandi fyrir hönnun prófílsins. Einnig, þegar yfirborð lokaðs FRP prófíls hitnar myndast innri spennur í honum sem geta leitt til sprungumyndunar.

Breytilegt hitastig, innan þeirra marka sem brúarmannvirki á Íslandi eru útsett fyrir, virðist ekki hafa skaðleg áhrif á FRP prófíla umfram smávægilegar micro-sprungur af völdum mismunandi hitaþanstuðla plastefnis (e. matrix) og trefja (e. fibres).

Lágt hitastig skapar ekki vandamál fyrir FRP prófíla fyrr en það er komið undir -100°C, en þá verður plastefnið stökkt og brothætt. Við hefðbundna notkun í byggingariðnaði er lágt hitastig því ekki vandamál.

6.2 Bruni

Vegna efnasamsetningar sinnar eru FRP efni brennanleg og við bruna gefa þau frá sér þykkan, svartan, eittraðan reyk. Tendrunarhitastig er þó misjafnt eftir samsetningu FRP efnanna. Styrkur FRP prófíla lækkar mjög hratt við aukið hitastig og sem dæmi er togstyrkur við 300°C aðeins 20% af upprunalegum togstyrk. Þessir afleitu eiginleikar í bruna eru stærsta ástæða þess að FRP prófílar eru lítið notaðir sem burðarvirki í hefðbundnar byggingar. Þeir koma þó ekki í veg fyrir að hægt sé að nota FRP efni við brúarsmíði.

6.3 Frost/þíða

Prófanir á FRP prófílum fyrir brúardekk hafa sýnt að FRP efnið sjálft er ekki útsett fyrir frost-þíðu áhrifum. Hinsvegar er hætta á að frost-þíðu áraun geti skemmt tengingar milli FRP prófíla og annarra bygginarefna, t.d. steyptra bita eða slitlags.

6.4 Raki og selta

FRP efni eru ekki útsett fyrir "hefðbundinni" ryðgun eða áhrifum af seltu líkt og stál. Þau eru hinsvegar ekki ónæg fyrir raka- og saltmettuðu loftslagi. Líkt og með margt sem tengist FRP, hafa áhrif raka og seltu ekki verið rannsökuð nægilega til að alhæfa um getu þeirra til að standast raka- og seltuáraun.

Plastefni í röku umhverfi draga í sig raka frá umhverfinu þar til rakamettun er náð. Rakamagn og áhrif þess á efniseiginleika FRP er háð samsetningu þess en hefur aðallega áhrif á plastefnið en ekki trefjarnar. Efniseiginleikar sem eru háðir trefjunum, þ.e. áslægur styrkur, verður því ekki fyrir miklum áhrifum af raka. Efniseiginleikar sem eru háðir plastefninu, þ.e. skerstyrkur, geta hinsvegar versnað til muna.

Hægt er að verja FRP prófíla fyrir raka- og seltu áhrifum með réttu vali á plastefnum (e. matrix) eða með yfirborðsmeðhöndlun.

6.5 Útfjólublá geislun

Útfjólublá geislun (UV geislun) getur valdið skaða á ýmsum gerðum plastefna (e. polymers). Geislunin veldur micro-sprungum á yfirborði sem hefur neikvæð áhrif á efniseiginleika FRP efnisins. Skemmdir af völdum UV geislunar getur einnig aukið á neikvæð áhrif raka og alkali virkni. UV geislun hefur hinsvegar ekki áhrif á glertrefjar. Áhrif UV geislunar er því atriði sem þarf að huga að við notkun FRP prófíla í brúargerð. Tryggja þarf að FRP sem er útsett fyrir UV geislun sé varið með réttri yfirborðsmeðhöndlun eða framleitt úr UV þolnum plastefnum.

6.6 Alkali virkni

Ef FRP prófílar eru í snertingu við steypu, eða notaðir sem togbending í steypnum þversniðum, er hætta á að basískir eiginleikar steypunnar (pH á bilinu 12-13,5) valdi skemmdum á glertrefjastyrktum fjölliðum (e. glass FRP). Tryggja þarf að FRP sem er í snertingu við steypu sé framleitt með alkaliþolnum plastefnum.

6.7 Raunveruleg dæmi

6.7.1 West Mill brúin

West Mill brúin er fysta vegbrúin í Evrópu sem byggð er eingöngu úr FRP efnum (Mynd 6). Hún var reist árið 2002 og var afrakstur 4 ára rannsóknarverkefnis sem kallast ASSET. Brúin spannar 10m og er 6,8m á breidd. Þyngd brúarbitanna og brúargólfsins er um 12 tonn (170 kg/m²) og brúin er hönnuð fyrir 13,5 tonna öxulþunga.

Hluti af ASSET rannsóknarverkefninu var að gera reglubundnar úttektir á brúnni til að sannreyna endingu byggingarefnisins. Tilraunir sem framkvæmdar voru 2005 og 2010 sýndu að engar breytingar höfðu átt sér stað á eiginleikum burðarvirkisins frá upprunalegu ástandi.

Nánari upplýsingar má sjá í grein [3].



Mynd 6: West Mill brúin í Oxford skíri í Bretlandi

6.7.2 Fiberline brúin í Kolding

Áður í þessari skýrslu hefur verið minnst á Fiberline brúna sem byggð var 1997 í Kolding í Danmörku (sjá Mynd 1). Brúin spannar 40m, er 3,2m á breidd og er eingöngu byggð úr FRP efnum. Hún var hönnuð af Ramböll og Fiberline og þólar 500 kg/m² notálag. Brúin var reist á samtals 18 tímum á 3 næturvöktum. Við uppsetningu brúarinnar var komið fyrir 28 streitunemum á ólíkum stöðum í burðarvirkinu til að fylgjast með hver langtíma hegðun burðarvirkisins yrði.

Í febrúar 2013 framkvæmdi Ramböll ástandsathugun á Kolding brúnni að beiðni Kolding Kommune. Tilgangur athugunarinnar var að meta efniseiginleika FRP efnisins í brúnni eftir 15 ára notkun. Almennt fékk brúin góða einkunn úr athuguninni (d. „Broen har det generelt rigtig godt“). Ramböll fullyrðir í skýrslunni [17] að efniseiginleikar FRP efnanna séu óbreyttir eftir 15 ára notkun.

7. Burðarþolshönnun

Í þessum kafla verður fjallað stuttlega um atriði sem þarf að hafa í huga við burðarþolshönnun FRP prófíla. Hér verður stuðst við hönnunarleiðbeiningar fyrir FRP prófíla í „Eurocomp Design Code and Handbook“ og handbókina „Fiberline Design Manual“ frá Fiberline í Danmörku.

Hluti af verkefninu fólst í að frumhanna breikkun fyrir göngu- og hjólarein úr FRP á núverandi brú yfir Laxá á Breið á Snæfellsnesi. Fyrirliggjandi var hönnun frá Vegagerðinni á slíkri breikkun úr stáli (sjá Viðauka A). Frumhönnun Mannvits á FRP burðarvirki má sjá í Viðauka B.

7.1 Álagsforsendur

Eurocomp handbókin byggir á sömu hugmyndafræði og evrópsku þolhönnunarstaðlarnir Eurocodes. Hönnunin byggir á hlutstuðlaaðferð og greint er á milli brotmarka- og notmarkaástands. Vísað er til Eurocode 0 (EN 1990) og Eurocode 1 (EN 1991) til ákvörðunar á álagi, álagsstuðlum og fléttustuðlum.

7.2 Efnisgæði

Mikilvægt er að hafa í huga að FRP er misleitt (e. Orthotropic) efni og því eru stífni- og styrkeiginleikar þess mismunandi eftir stefnum. Forðast skal að leggja hátt álag þvert á stefnu trefjanna.

Staðallinn ÍST EN 13706 skilgreinir tvo styrkleikaflokka, E23 og E17, og lágmarksgildi fyrir stífni og styrk sem FRP prófíll í hvorum flokki fyrir sig þarf að uppfylla. Tafla 5 sýnir lágmarksgildi fyrir E23 og E17 og til samanburðar má sjá gildi fyrir smíðastál S235 (án efnisstuðla).

Tafla 5: Efnisgæði E23, E17 og stáls S235

	FRP E23	FRP E17	Stál S235
Fjaðurstuðull í stefnu trefja	23 GPa	17 GPa	210 GPa
Fjaðurstuðull þvert á stefnu trefja	7 GPa	5 GPa	210 GPa
Togstyrkur í stefnu trefja	240 MPa	170 MPa	235 MPa
Togstyrkur þvert á stefnu trefja	50 MPa	30 MPa	235 MPa
Beygjustyrkur í stefnu trefja	240 MPa	170 MPa	235 MPa
Beygjustyrkur þvert á stefnu trefja	100 MPa	70 MPa	235 MPa
Skerstyrkur	25 MPa	15 MPa	235 MPa
Skerstífni	3 GPa	-	81 GPa

Eins og sjá má er áslægur styrkur og beygjustyrkur FRP í stefnu trefja sambærilegur og hefðbundins smíðastáls. Hinsvegar er beygjustífni FRP aðeins um 1/10 af beygjustífni stáls. Þetta þýðir að formbreytingar verða allsráðandi við hönnun burðarvirkja úr FRP og líklegt er að aðeins hluti af hinu háa beygju- og togþoli efnisins sé raunverulega nýtt.

Vegna efniseiginleika FRP má telja vænlegast að nota FRP prófíla til að byggja upp grindarbita (e. truss) í stað þess að notast við bita. Þá er aðallega um að ræða tog- og þrýstikrafta í prófílunum og þar liggja helstu kostir FRP efnanna.

Vegna lágrar skerstífni FRP prófíla þarf að reikna með áhrifum sker formbreytinga (e. shear deformation) í útreikningum á heildar formbreytingum.

Efnisstuðull fyrir FRP efni er skilgreindur í Eurocomp sem margfeldi 4 stuðla:

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{m3} \cdot \gamma_{m4}$$

Stuðlarnir eru gefnir með lágmark og hámark og eru háðir m.a. efnisvali, framleiðsluaðferð, umhverfisáreiti og hitastigi. Í töflum 6 og 7 má sjá uppgöfin há- og lágmark gefin í Eurocomp svo og það gildi sem Fiberline hefur valið í sínum hönnunarleiðbeiningum.

Tafla 6: Efnisstuðlar fyrir FRP samkvæmt Eurocomp og Fiberline

		Eurocomp max	Eurocomp min	Fiberline
$\gamma_{m,1}$	Óvissa í efnisgæðum	2,25	1,15	1,15
$\gamma_{m,2}$	Degree of postcuring	1,7	1,1	1,1
$\gamma_{m,3}$	Framleiðsluaðferð	2,0	1,0	1,0

Tafla 7: Efnisstuðull háður hitastigi $\gamma_{m,4}$

	Hitastig	Skammtímaálag	Langtímaálag
$\gamma_{m,4}$	-20°C til +60°C	1,0	2,5
$\gamma_{m,4}$	80°C	1,25	3,13

Samkvæmt Fiberline er því efnisstuðull fyrir skammtímaálag $\gamma_m = 1,3$ en $\gamma_m = 3,2$ fyrir langtímaálag. Til samanburðar má nefna að efnisstuðull fyrir stál er $\gamma_s = 1,0$

Vegna lágrar stífni þvert á stefnu trefja eru FRP bitar viðkvæmari fyrir fyrirbærum á borð við hliðarkiknun (e. Lateral torsional buckling) og staðbundinni kiknun (e. Local buckling of walls). Þessi brotform þarf að hugsa sérstaklega um við hönnun með FRP prófílum.

Rúmþyngd FRP efnis er aðeins um þriðjungur af rúmþyngd stáls og hlutfall eiginþyngdar af heildar áraun á burðarvirki úr FRP er því lágt. Við hönnun göngubrúa úr FRP ber að hafa í huga að vegna tiltölulega lágrar stífni og lítills massa getur virkið verið viðkvæmt fyrir sveiflumögnun af völdum gangandi vegfarenda.

7.3 Tengingar

7.3.1 Almenn

Almennt má skipta tengingum í FRP mannvirkjum í tvo flokka, boltaðar tengingar og límdar tengingar. Tölur 8 og 9 lista upp helstu kosti og ókosti beggja flokka.

Tafla 8: Kostir og ókostir boltaðra tenginga

Kostir	Ókostir
Ekki þörf á sérstakri yfirborðsmeðhöndlun	Lágur styrkur gegn punktkröftum
Hægt að taka í sundur (t.d. til að skipta út prófíl)	Tímafrek samsetning
Auðvelt að ástandsskoða	Þörf á sérstökum þéttingum ef virki á að vera vatnspétt
„Quasi-ductile“ brot	Ryðmyndun í stálfestingum

Tafla 9: Kostir og ókostir límdra tenginga

Kostir	Ókostir
Hægt að ná háum styrk í tengingu	Ekki hægt að taka í sundur
Vatnspétt	Þörf á sérstakri yfirborðsmeðhöndlun
Ryðvandamál í lágmarki	Erfitt að ástandsskoða
Slétt/áferðarfalllegt yfirborð	Hitastig og raki geta haft áhrif á styrk tengingar
Há stífni	Stökkt brot

7.3.2 Boltaðar tengingar

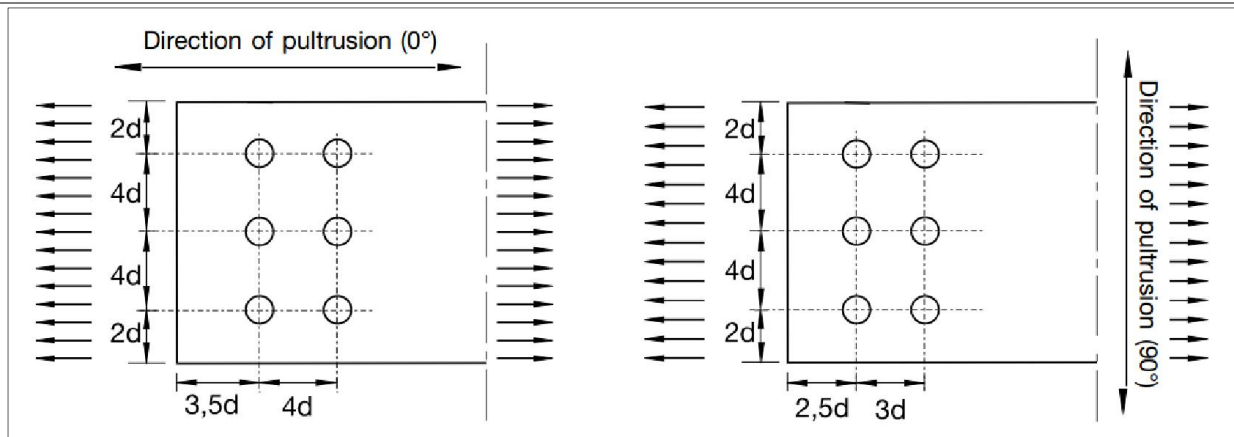
Hönnun boltaðra tenginga í FRP prófílum er svipuð og boltaðra tenginga í stáli eða timbri. Þó verður að hafa í huga að gatrandarstyrkur er talsvert lægri í FRP prófílum og þol þeirra þvert á stefnu trefja er talsvert lægra en í trefjastefnu. Annar stór munur á FRP og stáli er seiglan, FRP brotnar í stökku broti án nokkurrar toglangingar meðan stálið hegðar sér á mjög plastískan hátt áður en það brotnar.

Skoða þarf öll hugsanleg brotform þegar tenging er hönnuð. Líklegast er að styrkur boltanna sé talsvert hærri en styrkur prófílsins.

Nokkrar reglur varðandi boltatengingar frá Fiberline :

- Nota skal bolta úr ryðfríu stáli eða galvaniseruðu.
- Ekki er leyfilegt að bora skrufgang í FRP efni.
- Skrufur skulu vera með skafti
- Mælt er með að nota stórar skinnur >2,5 x d

Í leiðbeiningunum frá Fiberline er að finna álagstöflur fyrir boltaðar tengingar og reiknuð dæmi. Þar er einnig að finna reglur um lágmarks kantfjarlægðir og fjarlægðir milli bolta (sjá mynd 7).



Mynd 7: Kantfjarlægðir úr Fiberline Design Manual

7.3.3 Límdar tengingar

Ólíkt boltuðu tengingunum byggir hönnun á límdum tengingum ekki á þekktum reiknireglum. Annar stór ókostur er að brot í límdum tengingum eru mjög stökk og gera ekki boð á undan sér. Límdar tengingar hafa því ekki náð mikilli útbreiðslu þar sem FRP prófílar eru notaðir í burðarvirki. Þar sem límdar tengingar eru notaðar, eru oftast notaðir boltar að auki. Það er gert bæði til að klemma saman límfletina og til að auka öryggi tengingarinnar gagnvart stökku broti.

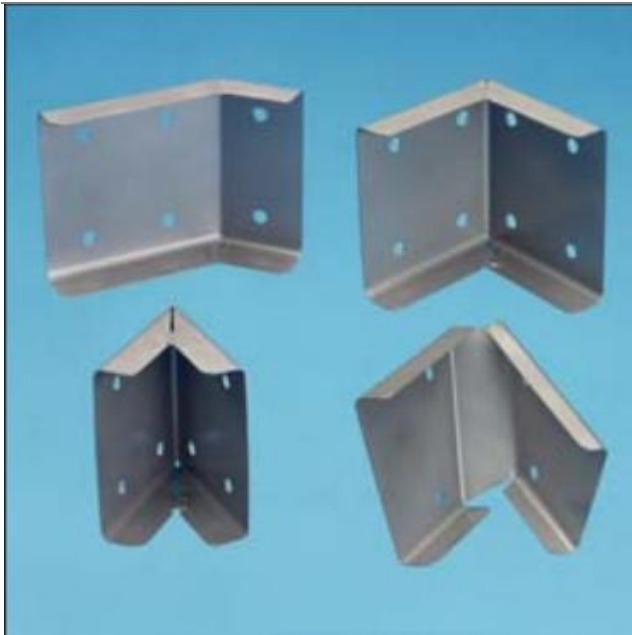
Hönnun límtenginga þarf að byggja á einu af eftirtöldu:

- Analýtísk líkön fyrir plötu-plötu tengingar skv. Eurocomp
- Hönnunarleiðbeiningum ásamt prófunum
- Finite element greiningu

Til að límdar tengingar hljóti almennar vinsældir meðal burðarvirkjahönnuða þarf frekari rannsóknir á þeim og staðlaðar reiknireglur.

7.3.4 Aðrar tengingar

Framleiðendur FRP prófíla hafa sumir hverjir þróað laska úr ryðfrú til að tengja saman FRP prófíla. Mynd 8 sýnir slíka laska frá Fiberline.



Mynd 8: Laskar úr ryðfríu stáli úr Fiberline Design Manual

Einnig hafa verið þróaðir FRP boltar með samskonar framleiðsluaðferð og FRP prófílar. Sjá t.d. heimasíðu Strongwell (www.strongwell.com/products/studs-and-nuts/) sem framleiða bolta undir vörumerkinu FIBREBOLT®

7.4 Skrið (e. Creep)

Skrið er skilgreint sem tímaháð formbreyting efnis vegna stöðugs utanaðkomandi álags, þ.e. streita í efninu eykst með tíma, þrátt fyrir að álag sé óbreytt.

Líkt og steypa verða FRP efni fyrir skriði af völdum stöðugs utanaðkomandi álags. Að auki geta hiti og raki aukið á áhrif skriðs í FRP efnum. Til að forðast áhrif skriðs mælir Fiberline með að langtímaálag á FRP burðarvirki sé ekki meira en 1/3 af brotstyrk efnisins. Hér skortir þó frekari rannsóknir á hegðun FRP undir stöðugu álagi og líklegt er að þessi regla sé heldur íhaldssöm. Þessi þumalputtaregla ætti þó ekki að vera vandamál í göngubrúum, þar sem langtímaálag (eiginþyngd brúarinnar) er á bilinu 10-15% af notálagi og notálag á göngubrýr er ekki viðvarandi álag.

7.5 Þreyta (e. Fatigue)

Miklar rannsóknir hafa verið gerðar á þreytuhegðun FRP efna í flugvélaíðnaðinum en mjög takmarkaðar rannsóknir eru til fyrir þreytuhegðun FRP efna í byggingariðnaði. Þó ekki sé hægt að yfirfæra rannsóknir úr flugvélaíðnaði beint yfir á byggingariðnaðinn benda rannsóknir til að þreytuhegðun FRP sé almennt jafn góð eða betri en stáls.

Efnisgæði plastefnisins (e. Polymer matrix) gegna lykilhlutverki í þreytuhegðun FRP prófíla þar sem trefjarnar virðast nokkuð ónæmar fyrir þreytuáraun. Góð þreytuhegðun FRP byggist að stærstu leyti á hörku plastefnisins og hvernig eiginleikar þess gegn sprungumyndun eru. Þessi atriði eru einnig mikilvægustu atriðin þegar kemur að þoli gegn umhverfisáreiti (sjá kafla 6).

Hiti og raki hafa áhrif á þreytuhegðun FRP þó erfitt sé að alhæfa út frá þeim rannsóknum sem hafa verið gerðar. Almennt má fullyrða að rannsóknir á áhrifum þreytu á FRP í byggingariðnaði skorti, þá sérstaklega langtímarannsóknir sem taka tillit til raka, hita og seltu og hrönnunar efnisins.

FRP prófíla þarf að hanna fyrir þreytuálagi líkt og stálvirki. Eurocomp gefur leiðbeinandi upplýsingar um leyfilegar spennur sem fall af fjölda álagsveiflna (e. load cycles). Sérstaklega þarf að huga að samtengingum sem verða fyrir þreytu álagi vegna spennutoppa sem myndast í kringum göt og bolta.

8. Samantekt

FRP prófílar hafa verið notaðir sem byggingarefni í göngubrýr undanfarna áratugi með góðum árangri. Kostir FRP prófíla umfram hefðbundin byggingarefni eru ótvíræðir á byggingarsvæðum þar sem örðugt er um aðflutninga, þar sem umhverfisáráun (t.d. sjávarselta) er mikil, þar sem nauðsynlegt er að lágmarka þyngd burðarvirkisins og þar sem byggingartími er takmarkaður.

Það er því ljóst að breikkun núverandi vegbrúa fyrir umferð gangandi og hjólandi með FRP prófílum er fýsilegur kostur sem rétt væri að skoða nánar hér á landi.

Helstu ókostirnir eru hár stofnkostnaður, reynsluleysi hönnuða og skortur á samræmdum hönnunarstöðlum. Það er því lagt til að næstu skref verði að fullhanna göngubrú, eða breikkun núverandi vegbrúar, framkvæma líftíma kostnaðargreiningu og bera saman við líftíma kostnað hefðbundinnar stálbrúar.

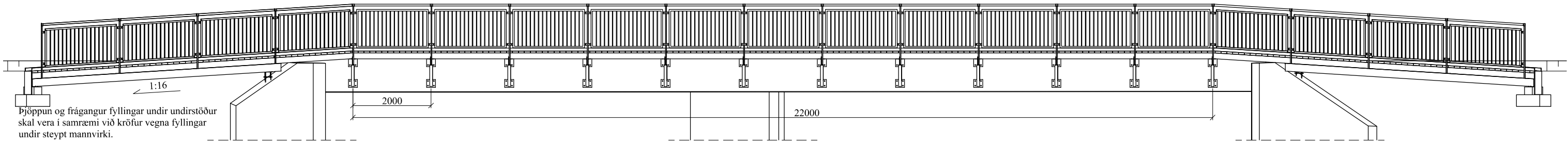
9. Heimildaskrá

- [1] A. Schumacher. Október 2009. „Design of FRP-Profiles and All-FRP-Structures“. Fyrirlestur.
- [2] Bank, L.C. 2006. „Composites for Construction. Structural Design with FRP Materials“. John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Canning, L. „Performance and 8-year load test on West Mill FRP Bridge“. Sótt á heimasíðu IIFC www.iifc-hq.org.
- [4] Davíð Þór Marteinsson. 2006. „Göngubrú úr trefjastyrktum fjölliðum (FRP)“. Lokaverkefni í Byggingartæknifræði við HR.
- [5] European Commission Joint Research Centre. 2007. „Purpose and Justification for New Design Standards Regarding the Use of Fibre-Reinforced Polymer Composites in Civil Engineering“.
- [6] Fiberline Composites AS. 2003. „Fiberline Design Manual“. Sótt 12. Febrúar 2015 af www.fiberline.com.
- [7] Hoffard, T.A., Malvar, L.J. May 2005. „Fiber-Reinforced Polymer Composites in Bridges: A State-of-the-Art Report. Technical Memorandum TM-2384-SHR“. Naval Facilities Engineering Command.
- [8] Hota V.S. GangaRao, Vijay, P.V. November 2010. „Feasibility Review of FRP Materials for Structural Applications“. College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University.
- [9] ISIS Canada. March 2006. „ISIS Educational Module 2: An Introduction to FRP Composites for Construction“. Sótt 12. mars 2015 af www.isiscanada.com
- [10] ISIS Canada. March 2006. „ISIS Educational Module 8: Durability of FRP Composites for Construction“. Sótt 12. mars 2015 af www.isiscanada.com
- [11] ÍST EN 1990:2002. 2002. „Eurocode – Basis of structural design“.
- [12] ÍST EN 1991-2:2003. 2003. „Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges“.
- [13] ÍST EN 13706-1:2002. 2002. „Reinforced plastic composites – Specification for pultruded profiles – Part 1: Designation“.
- [14] ÍST EN 13706-2:2002. 2002. „Reinforced plastic composites – Specification for pultruded profiles – Part 2: Methods of test and general requirements“.
- [15] ÍST EN 13706-3:2002. 2002. „Reinforced plastic composites – Specification for pultruded profiles – Part 3: Specific requirements“.
- [16] Potyrala, P.B. June 2011. „Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures“. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [17] Ramböll. Febrúar 2013. „Generaleftersyn samt undersögelse af glasfiber. Bro nr. 22439 Gl. Strandvej“. Skýrsla.
- [18] The European Structural Polymeric Composites Group. 1996. „EUROCOMP Design Code and Handbook“. Taylor & Francis.
- [19] Triandafilou, L, O’Connor, J.S. Ártal vantar. „FRP Composites for Bridge Decks and Superstructures: State of the Practice in the U.S.“
- [20] Ushakov, A.Y et al. Ártal vantar. „Experience in Calculation and Experimental Researches for GFRP Pedestrian Bridge Constructions“.

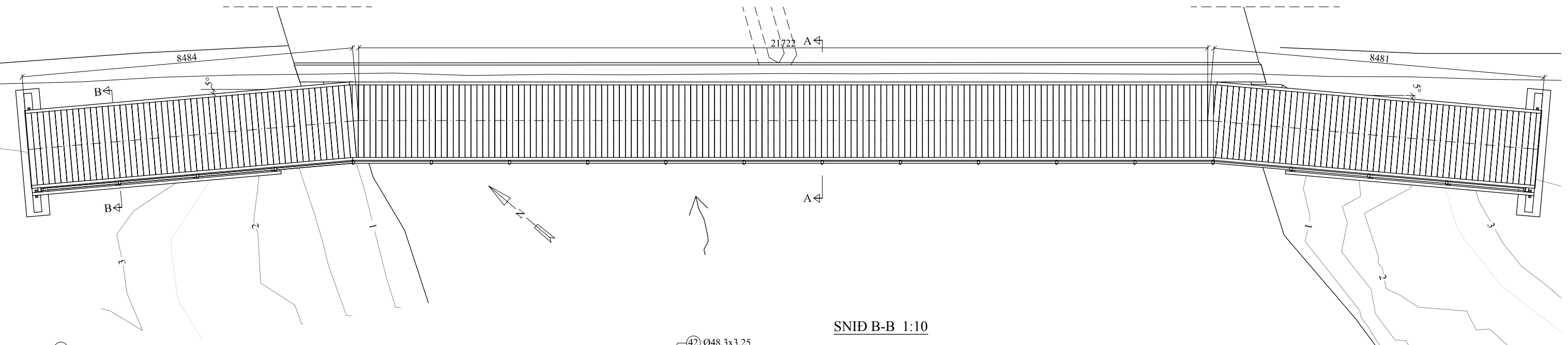
Viðauki A – Laxá á Breið – Göngubrú úr stáli

HLIÐARMYND 1:50

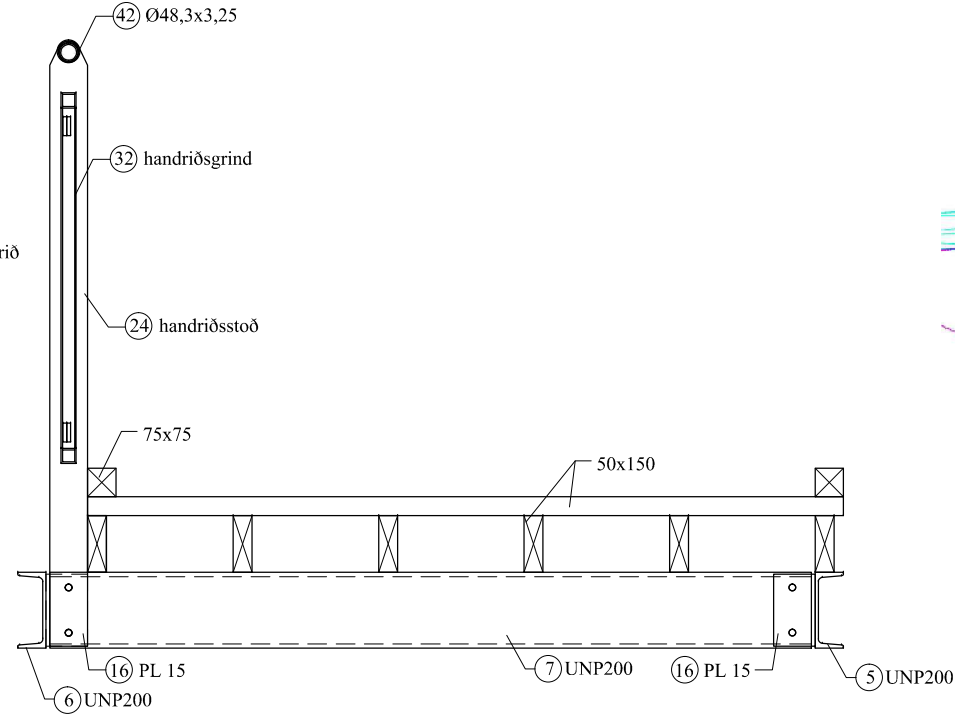
Til Ólafsvíkur



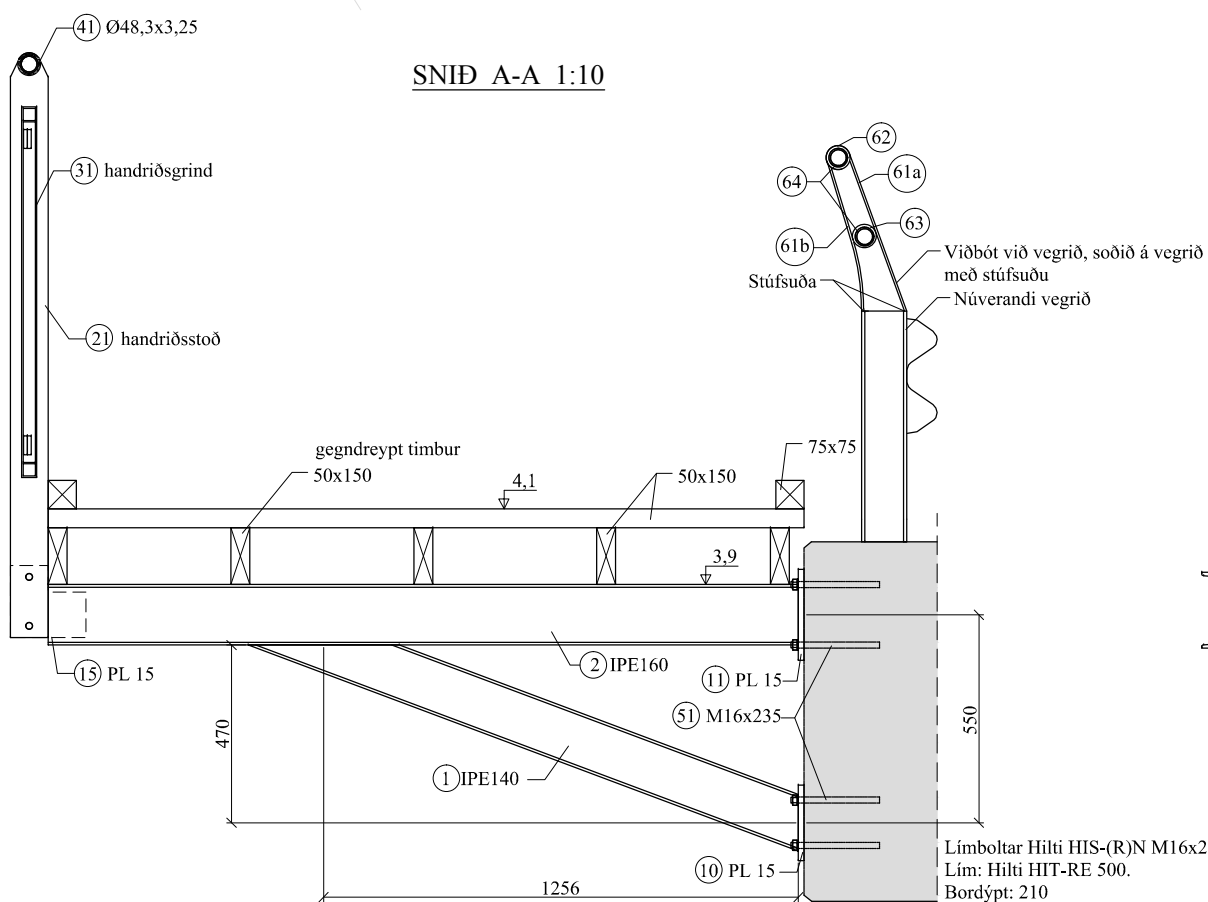
GRUNNMYND 1:50



SNIÐ B-B 1:10

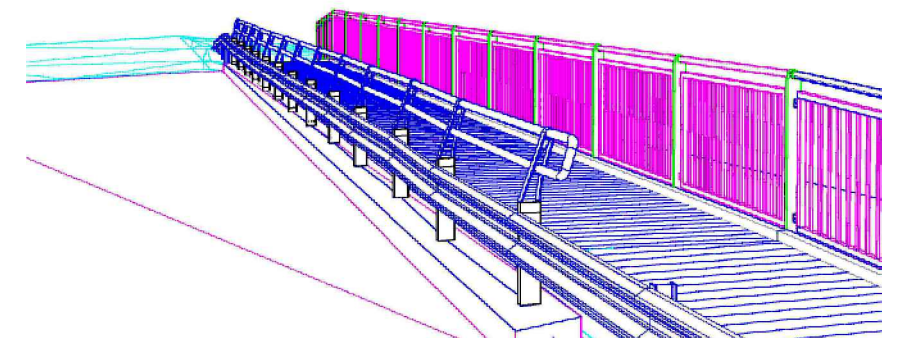


SNIÐ A-A 1:10



Límboltar Hilti HIS-(R)N M16x235
Lím: Hilti HIT-RE 500.
Bordýpt: 210
Um borun, hreinsun og límingu skal fylgja leiðbeiningum framleiðanda til hins ítrasta.

FJARVÍDD



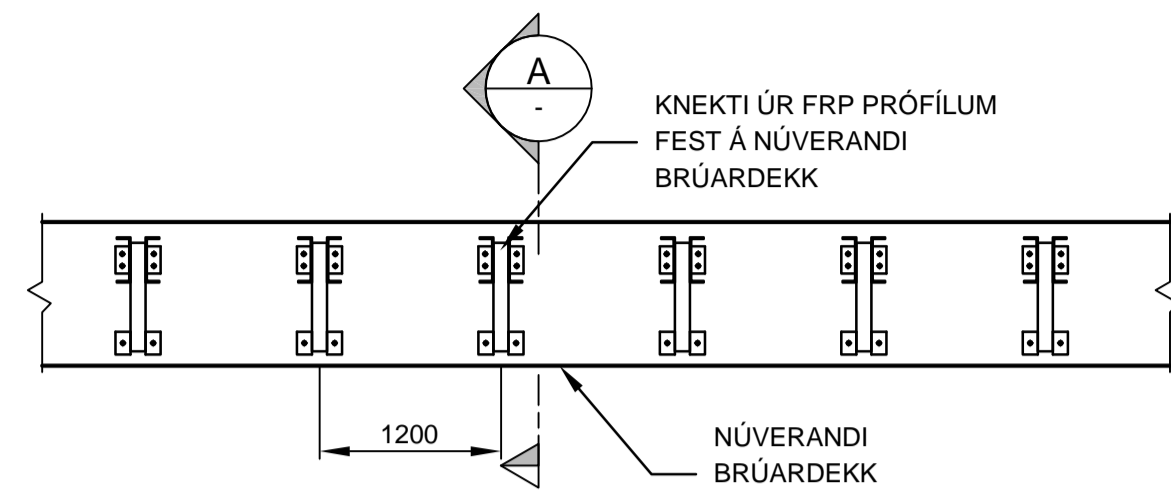
SMÆKKUN AF FRUMMYND MÆLIKVARÐI EKKI RÉTTUR

Skýringar:

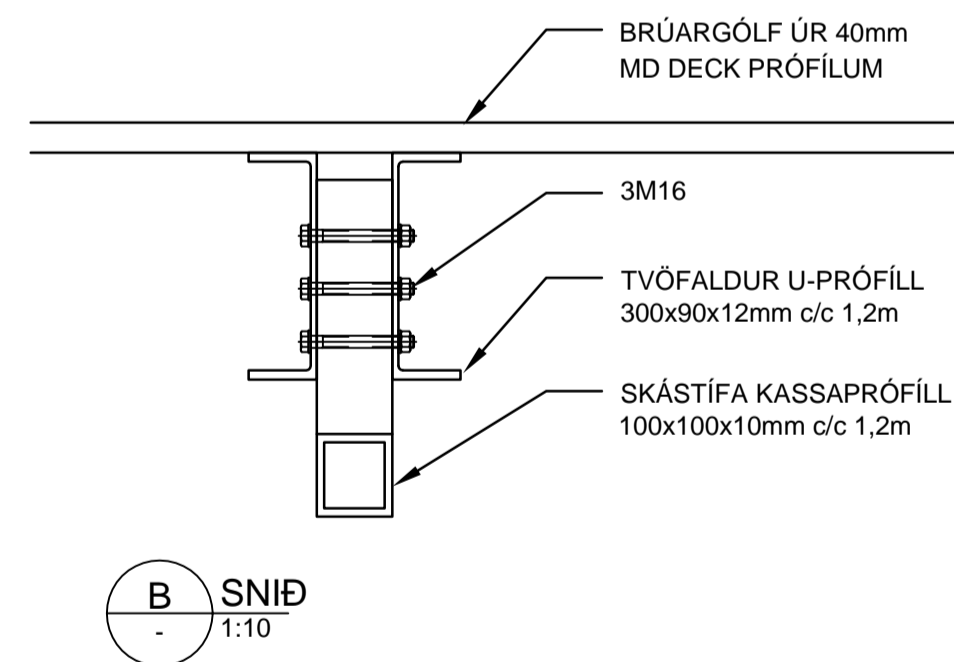
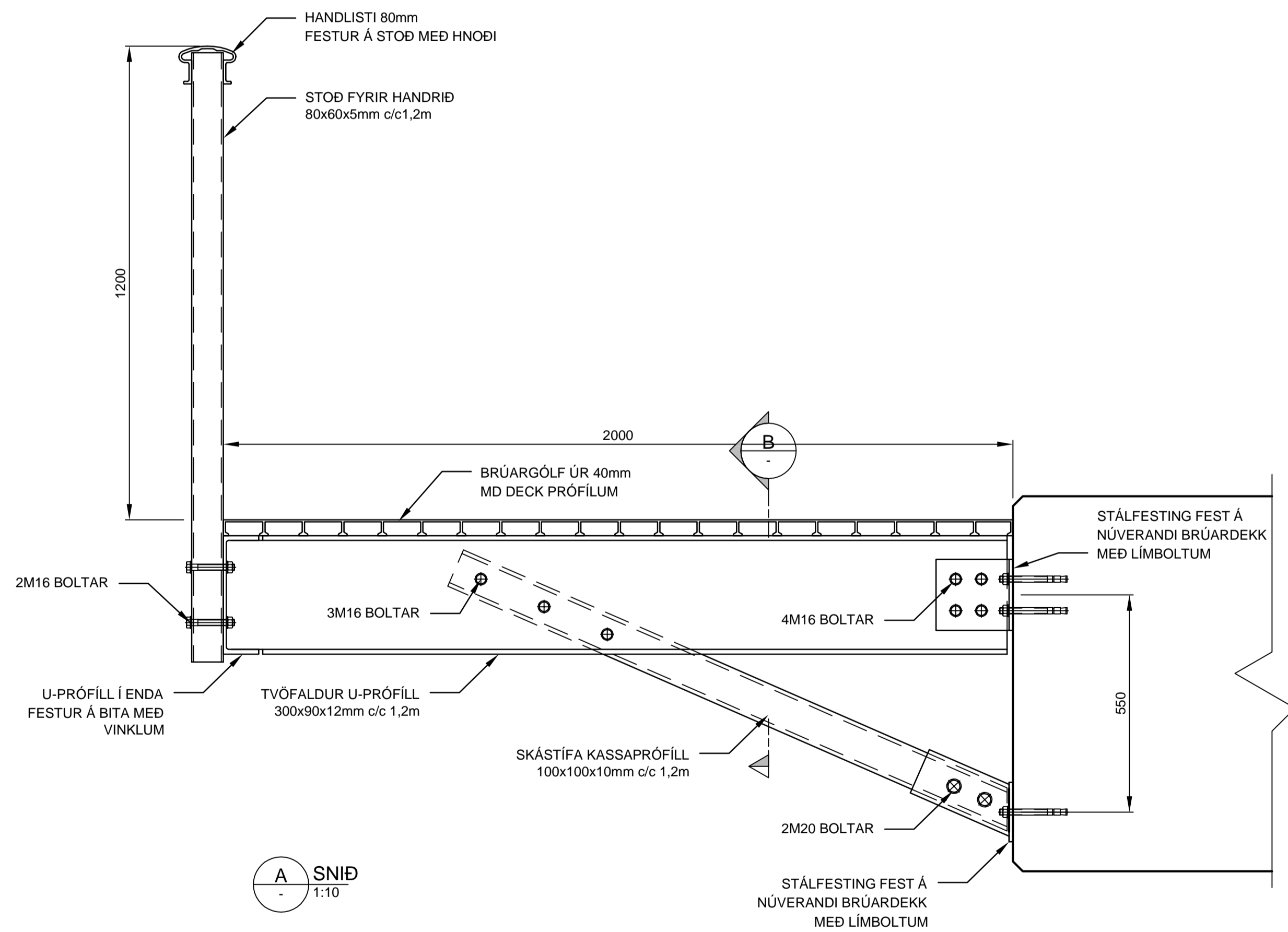
Hæðartölur eru í m.
Mál eru í mm.

VEGAGERÐIN		Laxá á Breið - göngubrú TJS/B	574-07
Mælikv: 1:10	Hannað: september 2013 GþG	Útnesvegur	Snæfellsnessýsla
1:50	Teikn: september 2013 GþG	L= 38,7 m	B= 2 m
	Yfirf.: x	Göngubrú - Yfirlitsmynd	
	Samþ.: x		
			A-1701
			B1-11492
			Blað 2

Viðauki B – Laxá á Breið – Göngubrú úr FRP



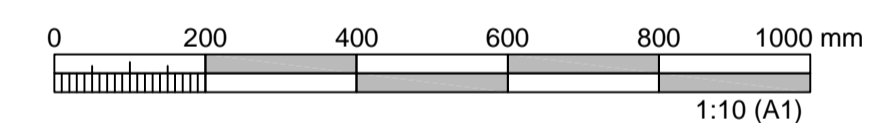
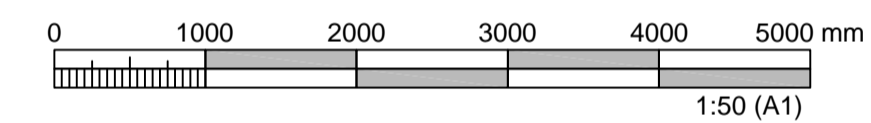
HLIÐARMYND - GÖNGUBRÚ
1:50 (A1)



SKÝRINGAR :

ALLIR PRÓFÍLAR ERU ÚR TREFJASTYRKTUM FJÖLLIÐUM "FRP".
FRP PRÓFÍLAR ERU HANNAÐIR Í SAMRÆMI VÍÐ "EUROCOMP DESIGN CODE AND HANDBOOK" OG "FIBERLINE DESIGN MANUAL".
FRP PRÓFÍLAR ERU FRAMLEIDDIR Í SAMRÆMI VÍÐ IST EN 13706 OG UPPFYLLA LÁGMARKSKRÖFUR E23.
REIKNAD ER MEÐ NOTÁLAGI 5,0 kN/m² Á GÖNGUBRÚ.

DRAFT



ÚTGÁFUFERILL					
ÚTG.	DAGS.	SKÝRINGAR	HANNAÐ	YFIR.	SAMB.
01	31.03.15	FRUMHÖNNUN	FH		
DAGS. UNDIRSKRIFTAR		F.H. MANNVIT'S (NAFN OG KT.)			

HÖNNUÐUR



MANNVIT
Úrdarvarfi 6 203 Kópavogi Sími: 422 3000 Fax: 422 3001
www.mannvit.is mannvit@mannvit.is Kt: 430572-0169

© ÖLL AFRÖT OG AFRITUN TEIKNINGAR, AD HLUTA EDA HEILD, ER HÁÐ SKRIFLEGU LEYFI HÖFUNDA.

HEITI VERKS

VEGAGERÐIN
GÖNGUBRÚ ÚR FRP
RANNSÓKNARVERKEFNI

HEITI TEIKNINGAR

GÖNGUBRÚ ÚR FRP PRÓFÍLUM

VERKNUMER	7.009.309	MKV.	STÆRD	A1
TEIKNINGANUMER	001	ÚTGÁFA	01	