

Yfirborð brúa Rannsóknarverkefni



Helgi S. Ólafsson
Gylfi Sigurðsson



Nóvember 2017

Vegagerðin

Hönnunardeild - Brýr

Nóvember 2017

Helgi S. Ólafsson

Gylfi Sigurðsson

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar styrkti rannsóknarverkefnið; [Yfirborð brúa](#).

Höfundar greinagerðarinnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnunar sem höfundar starfa hjá.

Efnisyfirlit

1.	Inngangur	1
1.0	Almennt	1
2.1	„Hefðbundna aðferðin“	3
2.1.1	Endurnýjun slitlaga í yfirborði sex brúa	5
2.1.1.1	Brú á Borgarfjörð	5
2.1.1.2	Brú á Sog við Þrastarlund	7
2.1.1.3	Brú á Blöndu á Blönduósi	8
2.1.1.4	Brú á Arnarneshæð	11
2.1.1.5	Brú á Kjálakfjarðará	14
2.1.1.6	Brú á Rauðalæk	14
3.1	Kröfur til yfirborðs brúa	15
3.1.1	Yfirborðslög	15
3.1.2	B2 - sérstakt steipt slitlag í þróun	16
3.1.2.1	Tengsl 40 – 50 mm lagsins við slitlagasteypur skv. gr. 2.1.1 og Bæjarháls m.t.t. sprungna 19	
3.2	Marglaga þétting	22
3.3	Áreitistig umhverfisins og yfirborðsvörn mannvirkisins	22
3.4	Vörn mismunandi yfirborðslaga	24
3.5	Áhrif hitabreytinga, skriðs og rýrnunar, sniðkraftar	24
3.5.1	Áhrif á slitlag úr malbiki	25
3.5.2	Áhrif í skilum burðarvirkis og steypis 40 – 50 mm slitlags	25
4.	Kostnaður, núvirtur kostnaður	28
4.0	Almennt	28
4.1	Malbiks slitlag	29
4.2	40 – 50 mm staðsteipt slitlag	32
	34
4.3	Kostnaður vegnotenda	34
4.4	Kostnaðaraukning burðarvirkis vegna slitlags	36
5	Til íhugunar og nánari skoðunar	39
5.1	Dæmi um viðgerðarkostnað	39
5.2	Mæla sprungudýptir og sprunguvíddir	39
5.3	Reynsla úr fyrri verkum og 40 – 50 mm rannsóknarverkefnið	39

5.4	Gera FEM reiknilíkan af steypu slitlagi ásamt burðarvirki	42
5.5	Samanburður og umfjöllun	43
5.6	Dæmi um slitlagalausnir annarra þjóða	47
6	Niðurstaða	49
7	Þakkir	49
Tilvísanir:		51



1. Inngangur

1.0 Almenn

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar veitti styrk á árinu 2016 til þess að vinna að verkefninu Yfirborð brúa. Í umsókninni sagði m.a.:

„Slitlag steyptra brúa úti á landi er í flestum tilvikum efsta yfirborð burðarvirkisins, sem er unnið, rétt af og sléttað sem hluti niðurlagnar steypunnar. Þetta er sýnilega ekki auðvelt, því steypumassarnir eru gjarnan miklir, hafa tilhneigingu til að renna til og missíga og einnig er snúið að stilla sleðabrautir / leiðara af efst í mótum. Í sumum tilvikum tekst þetta eigi að síður jafnvel ágætlega, en í öðrum tilvikum síður og nærtækt dæmi er yfirborð nýlegrar brúar á Múlakvísl. Vert er að skoða hvort endurbæta megi aðferðafræðina við það sem e.t.v. má kalla hefðbundinn yfirborðsfrágang eða hvort tímabært sé að steypa burðarvirkið sjálft fyrst og leggja síðan slitlagið í sér aðgerð annað hvort steyp t.d. 40 – 50 mm þykkt lag eða malbikað lag og þá með vatnsvarnarlagi í yfirborði steypunnar. Viðgerð hefðbundinna slitlaga með vatnsbroti er tímafrek og dýr sbr. Borgarfjarðarbrú auk þess sem aðgerðin getur nánar eftir staðháttum valdið umferðartöfum, sem er kostnaður sem taka þarf með í reikninginn. Slitlag eins og að framan er lýst er hins vegar fræst af yfirborðinu, sem er fljótleg aðgerð sbr. viðgerð á Arnarnesbrúnni. Verkefnið snýr að því að skoða hvort unnt er að endurbæta hefðbundnu aðferðina og síðan að bera saman mismunandi lausnir m.t.t. aksturseigneika, umferðaröryggis og kostnaðar.“

og:

Tilgangurinn er annars vegar að leitast við að stuðla að auknu umferðaröryggi því vegfarandi sem kemur inn á brýr reiknar með að aksturseiginleikar á brúnum séu þeir sömu og á veginum, en mikilvægt er að svo sé því varmarýmd brúarþversniðs er að jafnaði minni en vegþversniðsins og því myndast fyrr hálka á brúnum. Hins vegar að horfa til líftímakostnaðar mannvirkjanna, þ.e. stofnkostnaður að teknu tilliti til viðhaldskostnaðar og kostnaðar vegfarenda (tafir / óþægindi) á hönnunarlíftíma mannvirkjanna.

ennfremur:

Hafa verður í huga að sá galli felst í að nota efsta lag burðarvirkisins sem slitlag, að það gengur á það og þegar kemur að viðhaldi getur þurft að fræsa / brjóta ofan í burðarvirkið, þannig að um einhverja veikingu eða breytingu á því verður að ræða. Aðrir kostir felast í að vera með sérstakt slitlag, en þá skerðist burðarvirkið ekki sjálft þó á slitlagið gangi eða því skipt út. Algengast er líklega að leggja sérstakt þéttilag ofan á steypuna og þar yfir slitlag úr asfalti. Um nokkur lög er að ræða. Einnig kemur til álita að steypa nokkru síðar sérstakt, tiltölulega þunnt slitlag, 40 – 50 mm þykkt, yfir burðarhlutann. Slitlag þeirrar gerðar er einfalt og fljótlegt að fræsa ofan af yfirborðinu.

Yfirbygging er ekki aðeins berandi burðarvirki fyrir eiginþunga og notálag milli landstöpla og millistöpla heldur er hún einnig vörn og hjúpur um spennta og óspennta bendingu. Í riti International Federation for Structural Concrete, [fib Bulletin 33^{\(2\)}](#) frá 2006 voru sett fram meðmæli og aðferðafræði til þess að meta varnarþörf kapla út frá áreiti umhverfisins, þ.e. eftir því hvort það væri lítið, í meðallagi eða mikið.



Ísland er umlukið sjó og flestir vegir eru tiltölulega nálægt ströndinni. Umhverfis vegi og brýr er því á flestum árstíðum loftborið salt, sem nánar er háð veðri og vindum. Við loftborna saltið bætist oft á tíðum vegsalt, sem reikna verður með í vaxandi mæli horft til framtíðar eftir því sem þjónustukrafa vex og akstur ferðamanna á öllum árstímum eykst.

Ráðandi þættir í vörnum kapla er gerð ídráttarröra og yfirborðsvörn yfirbyggingarinnar. Með yfirborðsvörn er átt við sérstakt slit- og varnarlag yfir burðarvirkinu, en yfirborðsvörnin er ekki raunverulega virk nema fylgst sé með henni og henni reglulega haldið við yfir líftíma mannvirkisins. Líftími þéttilags án viðhalds er áætlaður 15 – 35 ár.

Ef horft er til annarra landa er algengast að líma á yfirborð steyptra burðarvirkisins ásoðna asfaldúka eða bera tveggja þátta þéttivörn á það, en yfir það kemur líklega í flestum tilvikum fyrst burðarlag og síðan slitlag úr malbiki, sjá nánar gr. 3.1.1.

Skv. ofangreindum meðmælum í [fib Bulletin 33^{\(2\)}](#) ætti fyrst að skilgreina áreitistig umhverfisins, velja síðan yfirborðsvörnina og loks varnarstig ídráttarröranna. Ef ekki er gerð krafa um sérstaka yfirborðsvörn fyrir kapla og bendingu í yfirborði burðarvirkis eru eftirfarandi meginkostir í stöðunni, sem nánar eru tíundaðir í gr. 3.1:

- Nota áfram sömu aðferðafræði og notuð hefur verið og kalla má „hefðbundnu aðferðina“, þ.e. að slitlagið sé efsti hluti burðarvirkisins, en hugsanlega með endurbótum, sem leiða til þess að yfirborðið verði sléttara eða a.m.k. minni líkur verði á því, að það verði óslétt. Við ákvörðun steypuhulunnar er þá tekið tillit til framtíðar slits
- Steypa sérstakt slitlag jafnframt því að burðavirki yfirbyggingar er steyptr, blautt í blautt. Við ákvörðun steypuhulunnar er þá tekið tillit til framtíðar slits. Þessi aðferð hefur ekki verið notuð hér á landi
- Leggja þéttilag (ýmsir möguleikar) yfir steypuna og síðan malbik í tveimur lögum, burðarlag og slitlag þar yfir. Í sumum tilvikum dugir e.t.v. eitt lag – slitlag. Endingartími þéttilagsins er áætlaður 15 – 35 ár án viðhalds og slitlags malbiksins eins og algengt er í vegum eða 6 – 12 ár. Þessa gerð slitlags má fjarlægja og endurnýja án þess að það hafi áhrif á burðarvirkið
- Leggja eftir á, þ.e. í framhaldi af uppsteypu yfirbyggingar, sérstakt, tiltölulega þunnt steyptr slitlag úr slitsterkri steypu 40 - 50 mm að þykkt yfir burðarvirkið. Í Norsku Brúahönnunarleiðbeiningunum, Håndbok 185 frá 2011 er talað um að líma slitlagið ofan á burðarvirkið. Lagið má fræsa burt þegar of mikið slit myndast í því án þess að það hafi áhrif á burðarvirkið að öðru leyti. Þessi aðferð var notuð hér á landi í brúnni á Arnarneshæð yfir Hafnarfjarðarveg, byggð 1990, þar sem slitlagið var upphaflega 80 mm þykkt og syðsta akreinin endurnýjuð með ~ 60 mm slitsterkri steypu 2013 eða eftir 23 ár. Sama aðferð var notuð í mislægum gatnamótum í Bæjarhálsi yfir Suðurlandsveg, byggð 1994, einnig með 80 mm þykku slitlagi

Hér á eftir verður leitast við að bera saman tæknilega kosti og galla aðferðanna og meta kostnað hvernar aðferðar til lengri tíma lítið og fá þannig fram núvirtan líftímakostnað hvernar aðferðar, þ.e. stofnkostnaður, viðhaldskostnaður og kostnaður vegnotenda á líftíma mannvirkjanna.

2.1 „Hefðbundna aðferðin“

Í „hefðbundnu aðferðinni“ er slegið upp fyrir burðarvirkinu, óspenntri og spenntri bendingu komið fyrir og burðarvirkið ásamt efsta hluta þess, sem virkar sem slitlag, steypst sem ein heild. Steypuvinnan endar þá með frágangi yfirborðsins og það sléttað, brettað o.e.t.v. kústað létt í langáttina.

Hér áður fyrr voru brýr einbreiðar og þversnið yfirbygginga ekki mjög há, en þetta hefur breyst með árunum, þannig að rúmmetra fjöldi steypu í yfirbyggingu hefur vaxið jafnt og þétt, en steyputækni jafnframt fleygt fram. Í sumum tilvikum, þegar rúmmetra fjöldinn er mestur, er unnið að niðurlögn steypunnar í yfirbygginguna í 2 – 3 daga.

Steypa þarf ákveðinn tíma til þess að síga eftir niðurlögn og lengri eftir því sem sniðið er hærra. Rúmmetra fjöldinn, há snið, vandkvæði við að koma traustum réttsskeiðum fyrir efst í mótí þversniðsins, langur niðurlagnartími t.d. 2 – 3 dagar veldur því að það tekst því miður ekki alltaf vel til með frágang / réttleika yfirborðsins. Yfirborð brúar getur því, þegar verst tekst til, orðið ósléttara en aðliggjandi vegir.

Varmarýmd brúarþversniðs er að jafnaði minni, jafnvel mun minni en aðliggjandi vega, en í því felst að háka myndast fyrir á yfirborði brúar en vegar, ef aðstæður eru þannig. Það er því áriðandi að við og á brú séu ekki misfellur, sem eru skeinuhættar í hálfu.



Mynd 1, Brú á Múlakvísl í smíðum 2014



Mynd 2, Brú á Múlakvísl í smíðum 2014. Endanlegt yfirborð frágengið að hluta

Í „hefðbundnu aðferðinni“ felst engin sérstök vörn fyrir slakbendingu og kapla umfram þá sem steypa veitir, en þétt og ósprungin steypa er út af fyrir sig mjög góð vörn.

Með Evrópustöðlunum var farið að gera kröfu um 100 ára líftíma brúa, en það innifelur að mannvirkið á að geta staðist þær kröfur sem gerðar voru til þess í upphafi án umfangsmikils viðhalds á skilgreindum líftíma. Evrópustaðlarnir tóku formlega gildi hér á landi 2011.

Í brúarvinnu út um land var lengi vel erfitt eða a.m.k. mjög dýrt að fá malbik í slitlög á brýr og það er enn kostnaðarsamara ef um lítið yfirborðsflatarmál er að ræða, sem yfirborð brúa er oftast, þar sem flutningsleiðir fyrir malbik og tæki eru oft á tíðum langar – sjá um kostnað í hluta 4.

Sú ályktun er dregin, að „hefðbundna aðferðin“ leiði til lægsta hugsanlega stofnkostnaðar, þar sem sérstökum yfirborðsfrágangi er sleppt og það þarf ekki að bíða eftir að honum sé komið í framkvæmd. Brúin kemst því fyrir í gagnið, en annars væri.

Þegar yfirborðið slitnar og það myndast slitrásir í það þarf að skoða hvort burðargeta brúar, sem um ræðir, sé þannig að hún geti tekið við viðbótarálagi frá nýju slitlagi eða hvort mögulegt sé að vatnsbrjóta eða e.t.v. fræsa ofan í burðarvirkið án þess að veikja það og steypa nýtt slitlag með viðráðanlegum viðbótarþunga fyrir óbreytt mannvirki. Einnig er hugsanlegt að í upphafi hafi verið séð fyrir þessu.



Mynd 3, vatnsbrot í yfirborði Sogsbrúar 2015 og Blöndubrúar 2016

Viðgerðir með vatnsbroti eru bæði tímafrekar og dýrar (Borgarfjarðar-, Blöndu- og Sogsbrýr) og í gr. 2.1.1 er leitast við að gera grein fyrir umfanginu. Ef fræsing er möguleg er hún hins vegar mjög fljótgerð sbr. brúin yfir Hafnafjarðarveg á Arnarneshæð, sjá gr. 2.1.1.4.

Það er því ljóst, að leysa þarf brýr sem eru í undirbúningi eða í ferli þannig að fræsa megi slitlagið eða hluta þess í burtu.

Taka verður tillit til kostnaðar vegfarenda, þ.e. ef þeir þurfa að fara aðra leið, draga úr hraða eða bíða t.d. vegna ljósastýringa. Einnig þarf að huga að slyshættu sem er að líkindum í hlutfalli við lengd viðgerðartímans o.fl.

Í **Töflu 1** eru kostir og gallar „hefðbundnu aðferðarinnar“ vegnir.

Metnir þættir	Kostir	Gallar
Stofnkostnaður	Lægri sem nemur yfirborðslagi	
Framkvæmdatími	Það sparast tími vegna yfirborðslagsins	
Mannvirkið í notkun	Mannvirkið kemst fyrr í notkun	
Meðmæli skv. Bulletin 33		Ekki uppfyllt
100 ára hönnunarlíftími		Ekki í samræmi við líftímahugsun
Viðbótarvörn fyrir kapla		Engin
Síðara viðhald		Getur reynst erfitt og dýrt að koma við
Sléttleiki yfirborðs		Erfitt að fá mjög gott yfirborð sérstaklega í stórum steypum

Tafla 1– kostir og gallar „hefðbundnu aðferðarinnar“

Ályktun:

Sú ályktun er dregin af því, sem að framan segir, að „hefðbundna aðferðin“ hafi lengi vel verið nærtæk meðan brýr voru ekki mjög stórar, umferð ekki mjög mikil og slit þess vegna lítið, takmarkaðar kröfur gerðar til yfirborðs brúa, ekki gerð krafa um 100 ára hönnunarlíftíma o.fl.

2.1.1 Endurnýjun slitlaga í yfirborði sex brúa

Steypugerð 40 – 50 mm slitlagsins, sem getið var um í hluta 1, byggir á blöndum sem fyrst voru þróaðar til viðgerða á yfirborði Borgarfjarðarbrúar, en þar voru notuð fylliefni úr Harðakambi (náma á Snæfellsnesi). Sambærilegar 40 – 50 mm slitlagsblöndur voru einnig þróaðar með fylliefnum frá Litla Horni (náma við Vestra Horn við Hornafjörð). Neðangreind dæmi eru sett fram til þess að skýra umfang viðgerðarverkefna þessarar gerðar, og leitast við að yfirfæra reynslu í 40 – 50 mm slitlagið.

Efst í burðarvirki brúa, sem byggðar eru með „hefðbundnu aðferðinni“, er gjarnan gert ráð fyrir sérstöku slitlagi, sem er steipt með burðarvirkinu og með sömu steypu og steypuhula á járnum aukin. Í útreikningum á burðargetu er hins vegar ekki tekið tillit til þeirrar umframhæðar, sem þar myndast. Þannig má segja, að ekki sé gengið á burðargetu gangvart jákvæðu vægi, sem reiknað var með í upphafi, þó slitlagið sé brotið ofan af burðarvirkinu. Skemmdir geta hins vegar verið það miklar, að nauðsynlegt sé að fara niður fyrir slitlagið og þá er gengið á burðargetu gagnvart jákvæðu vægi nema sérstakar ráðstafanir séu gerðar. Þær gætu t.d. falist í að stoða undir mitt haf ásamt að lyfta undir, sem oft er erfitt eða útilokað að koma við sbr. t.d. við Borgarfjarðarbrú.

2.1.1.1 Brú á Borgarfjörð

Umtalsvert slit var komið í yfirborðið, þannig að járn sáust staðbundið. Í vatnsbrotinu var lagt upp með að komast niður fyrir neðra lag járnendingar í efri brún eða brotdýpt 80 – 90 mm. Langjárnnum $\varnothing 8$ – 150 í efri brún var skipt út fyrir langjárn $\varnothing 10$ – 150, en þverjárn $\varnothing 12$ – 220 voru óbreytt, en járnending aukin út við bríkur. Vinna hófst við vatnsbrot og gerð slitlaganna 2013 og lýkur nú í haust 2017.



Myndir 4, dæmi um slit í yfirborði – slit komið niður í járnagrind



Myndir 5, steypuvinna 2013

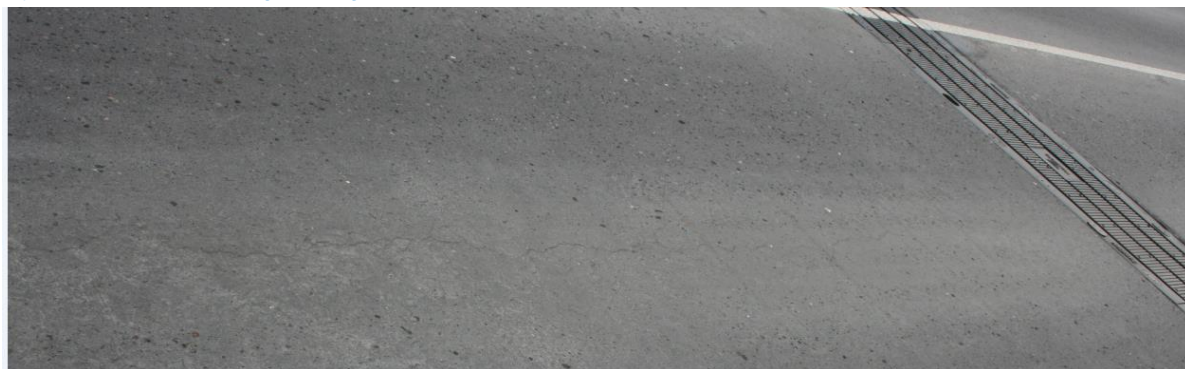


Mynd 6, steypuvinna 2013, slétt og fellt yfirborð

Finna má sprungur í yfirborðinu og eru það einkum langsprungur yfir bitum. Langsprungurnar eru raktar til mismunahreyfinga langbita, þ.e. þegar umferðarálág er á öðrum helmingi brúar, en ekki hinum. Dæmi er einnig um að lang- og þversprungur finnist og hverfi síðan eða séu vandfundnar aftur. Spurning er hvort það sé e.t.v. af völdum sjálflokunar sprungna (e: autogenes healing), en það er órannsakað.



Mynd 7, dæmi um sprungur í langátt



Mynd 8, annað dæmi um sprungur í langátt

2.1.1.2 Brú á Sog við Prastalund

Umtalsvert staðbundið slit var komið í yfirborðið Brúar á Sog eins og í Borgarfjarðarbrú. Í vatnsbrotinu var lagt upp með að komast niður fyrir neðra lag járnbandingar í efri brún eins og í Borgarfjarðarbrú eða brotdýpt 80 – 90 mm. Þverjárnin í efri brún voru $\varnothing 16 - 200$ og bætt við $\varnothing 16-400$ járnnum, vegna þess annars vegar að hluti járna voru slitin af völdum umferðar og hins vegar vegna þess að hluti járna hafði verið klipptur burt, því þau voru talin hættuleg umferðinni. Þannig jafngilti járn magnið nokkur veginn $\varnothing 16 - 133$ eftir breytingu í þverátt. Langjárnin voru $\varnothing 12 - 250$ og voru þau látin halda sér. Fylliefnin í steypuna voru í þetta sinn frá Litla Horni.



Myndir 9, dæmi um slit / skemmdir í yfirborði



Myndir 10, unnið að vatnsbroti og frágangi bendingar



Myndir 11, steypuvinnu lokið móti straumi og einangrunmottum (aðhlúun) hefur verið komið fyrir



Mynd 12, 2015



Mynd 13, 2017



Myndir 14, þversprungur í yfirborði 2017

Þversprungur fóru fljótlega að koma fram í yfirborðinu og leit út fyrir að minna yrði um þær í akreininni undan straumi, en í þegar yfirborð brúar var skoðað 2017 _ 07 var ekki um augljósan mun að ræða. Fjarlægð milli sprungna er breytileg eða á bilinu 600 – 1200 mm. Sprungurnar virðast vera fínar. Yfirborðið virkar mjög slétt og fellt, þegar ekið er yfir brúna.

2.1.1.3 Brú á Blöndu á Blönduósi

Eins og í fyrrnefndum brúm var um staðbundið slit að ræða í Brú á Blöndu. Járn höfðu verið klippt burt, þar sem hættu var talin stafa af þeim. Mælingar leiddu í ljós, að enginn þverhalli var á brúnni. Óvarlegt var talið að brjóta mikið frá járnnum vegna þess hvernig platan er uppbyggð, en einnig þurfti að koma fyrir vegriði í flokki H2 á brík móti straumi, en til þess þurfti að auka



Myndir 15, dæmi um slit / skemmdir í yfirborði

járnbandingu verulega í þverátt. Það var því ekki markmiðið að brjóta frá jörnum, þannig að mögulegt væri að steypa umhverfis þau, heldur að móta rúmlega 10% „þakhalla“ halla á yfirborðið.

Af þessari ástæðu var lagt upp með sjálfstæða járnbandingu í slitlaginu $\varnothing 12 - 150$ í þverátt og $\varnothing 10 - 150$ í langátt. Fylliefnin voru frá Harðakambi og steypun blönduð í steypubíl á staðnum – svokölluð truckasteypa, sem var fyrsta raunsteypa slitsterkrar steypu með þessari aðferð.

Ástandið á brúnni reyndist mun lakara í akreininni móti straumi, en í akreininni undan straumi, þegar farið var að brjóta og áætlað hafði verið í ljósi reynslunnar við það að vinna við akreina undan straumi. Það var þó misslæmt eftir því hvar var á brúnni, en þetta leiddi eigi að síður til þess að útkrögun ásamt brík móti straumi var brotin og líklega þarf að fara í sömu eða sambærilegar aðgerðir í útkrögun undan straumi.



Myndir 16, ófrostþolin steypa, en misjafnt eftir hvar á brúnni



Myndir 17, járngrindin í akrein undan straumi tilbúin – steypu blandað í steypubíl - truckasteypa



Mynd 18, verið að vinna að útkrögun móti straumi

Mynd 19, hitaþráðum var komið fyrir

Hitapráðum var komið fyrir í steypunni eins og fram kemur á [Mynd 19](#) þar sem hitastig var lágt og síðan var steyp 2017_01_23.

Sprungur voru ekki sýnilegar í yfirborðinu framan af, en á því varð breyting eins og sést á [Myndum 20 og 21](#).

Sprungubreiddir og sprungudýptir hafa ekki verið mældar að svo komni máli hvorki í Blöndubrú né hinum tveimur.



Mynd 20 – frá 2017_09_06



Mynd 21 – frá 2017_09_06

2.1.1.4 Brú á Arnarneshæð

Brúin var byggð 1990 með sérstöku ~ 80 mm þykku slitlagi, þrýstistyrkur steypu S500 (~C50/60), sem var með stáltreffjum, en ekki sérstaklega þróuð m.t.t. slitstyrks. Lagið var ekki límt sérstaklega. Sprungur eða los hafa ekki komið fram í sjálfu laginu. Það voru hins vegar komnar hjólfararásir í slitlag syðstu akreinarinnar þar sem mest er ekið um og ákveðið að fræsa ~ 60 mm þykkt lag ofan af henni sumarið 2013 og endursteypa með slitsterkri steypu sömu gerðar og er í Brú á Borgarfjörð. Stærð flatarins var ~ 220 m², og það tók ~ 1 klst. að fræsa lagið í burt og síðan var endursteypt daginn eftir ~13,5 m³ á þessa ~ 220 m², sem skipt var upp í þrjá hluta hvað tengingu við undirlagið varðar:

- Einn hluti límdur með Mapei Mapepoxy L

- Annar hluti límdur með Mape Mapecoat
- Þriðji hlutinn ólímdur

Engin sjáanlegur munur er á yfirborðinu eftir því hvort lagið var límt eða ekki.

Það verður ekki annað sagt, en að upphaflega slitlagið á syðstu akreininni hafi enst afar vel án viðhalds eða í 23 ár þrátt fyrir mikla umferð. Ekkert hefur verið gert við hinar 3 akreinarnar.

Brúin í Bæjarhálsi er einnig með 80 mm staðsteyptu slitlagi án stáltrefja, en með steypustyrk C80/95 og virðist hafa komið vel út. Slitlagið hefur ekki verið endurnýjað og þannig fellur hún í reynd ekki undir gr. 2.1.1, en eigi að síður talið rétt að upplýsa um hana hér.

Sú spurning hlýtur að vakna hvers vegna sama aðferð eða sambærilegar aðferðir, sem gefist hafa svo vel í þessum tveimur brúm, hafa ekki verið notaðar í fleiri áþekktum tilvikum og þróaðar áfram? Í flestum öðrum brúm innan Stór Reykjavíkursvæðisins var malbik notað sem slitlag eftir þessar brýr enda e.t.v. rökrétt - sama yfirborð í vegi og brú, ef umferðarhraði er tiltölulega mikill. Úti á landi virðist sem „hefðbundna aðferðin“ hafi oft eða oftast verið talin rétta lausnin.

Eins fjallað er um í gr. 5.3 má e.t.v. líta á gerð staðsteypts slitlags á Brúna á Arnarneshæð, sem langa samfellda tilraun, sem rökrétt er að horfa á í samhengi við 40 – 50 mm rannsóknarverkefnið sbr. gr. 3.1.2. Sama á við um 80 mm staðsteypta slitlagið á brúnni í Bæjarhálsi yfir Suðurlandsveg, sem var byggð 1994.



Myndir 22 – slitlag syðstu akreinarinnar, akreinar lengst til vinstri á myndinni var endurnýjað



Myndir 23 – unnið að því að fræsa burt ~ 60 mm þykkt lag gamla steypa slitlagsins með malbiksfræsara



Myndir 24 – niðurlögn



Mynd 25 – stálfrefja sýnilegar í gamla yfirborðinu

Yfirborð brúarinnar var skoðað í september 2017 og var ekki annað að sjá en það væri nánast sprungulaust, en það litla sem var að finna er á [Myndum 26 og 27](#). Þannig markar líklega fyrir sprungu fyrir miðri [Mynd 26](#) og á [Mynd 27](#) er ~ 150 mm löng sprunga.



Mynd 26 – hugsanlega markar fyrir sprungu í miðri mynd



Mynd 27 – ~ 150 mm löng sprunga við gangstétt að sunnanverðu



2.1.1.5 Brú á Kjálakfjarðará

Brúin á Kjálakfjarðará var reist 1967. Við hana var gert 2001 með því að steypa 70 mm stáltrefjastyrkt lag með $\varnothing 7$ mm bendistálmottum og með fylliefnum frá Harðakambi, 0 – 8 mm og 8 – 14 mm, en steypustyrkur liggur ekki fyrir. Steypan var blönduð í steypubíl, svokölluð truckasteypa. Undirlagið var undirbúið með sandblæstri. Á þessum tíma var valin steypugerð hvorki prófuð m.t.t. slitstyrks eða rýrnunar.

Þegar brúin var skoðuð 2013 leit gólfið mjög vel út og aðgerðin virðist hafa heppnast mjög vel. Brúin er nú skráð utan þjóðvega í brúakerfi Vegagerðarinnar.

2.1.1.6 Brú á Rauðalæk

Brúin á Rauðalæk var reist 1967. Við hana var gert 2004 með því að steypa 70 mm þykkt steypst slitlag með Strux stáltrefjum, 2,3 kg / m³ steypu, steypustyrk C35/45 með 400 kg / m³ af sementi og $v/s \leq 0,4$. Undirlagið var undirbúið með sandblæstri og það kústað með blöndu af sementi, sandi og vatni í hlutföllunum 1 : 1 : 1.

Eins og sjá má þegar ekið er yfir brúna á dag og skv. myndum er brúargólfið mikið sprungið, þannig að augljóst er að hefti / viðloðun milli yngri og eldri steypu hefur gefið sig, en að öðrum kosti myndast ekki svo stórar sprungur. Reikna verður með að vatn og salt komist nú á milli laga.

Skv. myndum, sem teknar voru fyrir gerð ásteypulagsins, voru talsverðar útfellingar næst útbrúnum brúarinnar að neðanverðu, sem benda til þess að steypan í brúnni sé e.t.v. alkalívirik og / eða ófrostþolin, sem skýrir mögulega heftibrotið eða viðloðunarbrestinn.

Eftir á má e.t.v. draga þá ályktun, að ofangreind viðgerðaraðferð hafi ekki verið líkleg til þess að standast við þessar aðstæður og verður því ekki fjallað nánar um brúna hér á eftir.



3.1 Kröfur til yfirborðs brúa

3.1.1 Yfirborðslög

Yfirborðslögum er skipt upp í eftirfarandi flokka í handbók Norsku Vegagerðarinnar; R762, Prosesskode 2⁽⁶⁾ þar sem kröfur til mismunandi yfirborðslaga eru nánar skilgreindar og því ekki farið nánar út í það hér, en líta þannig út á samþjöppuðu formi:

- A2 Malbiksslitlag með einfaldaðri rakavörn á brúargólfið, sem skiptist í:
 - Gerð A2-1 með léttfljótandi epoxy
 - Gerð A2-2 með fjölliðubreyttri bikþeytu C60BP2
- A3 Malbiksslitlag með fullri rakavörn á brúargólfið, sem skiptist í:
 - Gerð A3-1 með epoxy og asfalti
 - Gerð A3-2 með ásoðnum dúk
 - Gerð A3-3 akrylat, pólyurethan, eða polyurea og límlagi
 - Gerð A3-4 með fjölliðubreyttum asfaltlögum ásamt húðum á brúardekkið

Í handbók Norsku Vegagerðarinnar [Håndbok 185^{\(10\)}](#) er eftirfarandi kostir skilgreindir:

- B1 Steypt slitlag, steypt sem ein heild við burðarvirkjasteypana, blautt í blautt
- B2 Slitlag steypt sérstaklega eftir á og talað um að lagið sé límt og undirlagssteypan hafi tekið sig (rýrnað)

Þær aðferðir sem hafa verið notaðar hér á landi eru:

- B1 úti um land í þeim skilningi, að slitlagið er sama steypa og er í yfirbyggingunni að öðru leyti og steypuhulan á jörnum aukin
- B2 - aðferðin var notað á Brú á Arnarneshæð, en lagið var ekki límt á undirlagið 1990. Aðferðin var einnig notuð á brúna í Bæjahálsi 1994 án þess að það væri límt. Hugsanlega má segja að gert hafi verið við brúna á Kjálkafjarðará með sömu aðferð
- A2-2 lag á Reykjavíkursvæðinu í nokkrum mannvirkjum, en þar hefur bikþeyta verið notuð, en hvort hún hefur verið fjölliðubreytt liggur ekki fyrir
- A3-2 lag í allnokkrum mannvirkjum á Reykjavíkursvæðinu, þ.e. með ásoðnum dúk

Eins og fram kemur hér að framan í hluta 1.0 og gr. 2.1 er hætt við misfellum í steypu yfirborði brúa og yfirborðslag þarf því að vera þannig úr garði gert, að það geti rétt af hugsanlegar skekkjur, bylgjur eða misfellur, þannig að akstureiginleikar verði a.m.k. ekki lakari á yfirborði brúar en í veginum. Inn í það kemur almennt minni varmarýmd brúarþversniðs en vegkroppsins, sem áður hefur verið minnst á, þannig að hálka myndast fyrir á brúaryfirborðinu.

Hvernig á yfirborðið að vera, hverju er verið að leita eftir, hverjar eru kröfurnar?

Brú er hluti af vegi og yfirborðið þarf því a.m.k. að uppfylla sömu kröfur hvað varðar aksturseiginleika:

- vera slétt og felld, misfelliútið og slitsterkt m.t.t. hagkvæms viðhalds
- **hagkvæmt viðhald:** árangursríkt, fljótlegt, slitsterk endurnýjun, veikir ekki burðarvirkið
- mörkin milli brúar og vegar þurfa ekki síður að vera slétt og felld
- í því sambandi þarf að huga að mismunandi varmarýmd eins og komið hefur fram

Þar sem umferðarhraði er mikill er æskilegt að sama efni sé í veg- og brúaryfirborði. Þegar komið er út á land er oftast um klæðningu að ræða á vegum, þannig að þessi krafa yrði sjaldan uppfyllt. Þetta mundi þá almennt líta þannig út:



- malbik á veg- og brúaryfirborði
- klæðning á vegyfirborði og steypa eða malbik á brúaryfirborði

Hlutverk brúayfirborðsins er einnig að verja undirliggjandi burðarvirki sbr. umfjöllun í gr. 3.2.

Víðast út um land eru vegir klæddir, en ekki malbikaðir. Klæðning á yfirborð brúa gæti þannig virst koma til álita, en eins og sagði þá þarf lagið að vera þannig upp byggt að mögulegt sé að rétta yfirborð burðarvirkisins af, en það gengur ekki með klæðningu einni sér.

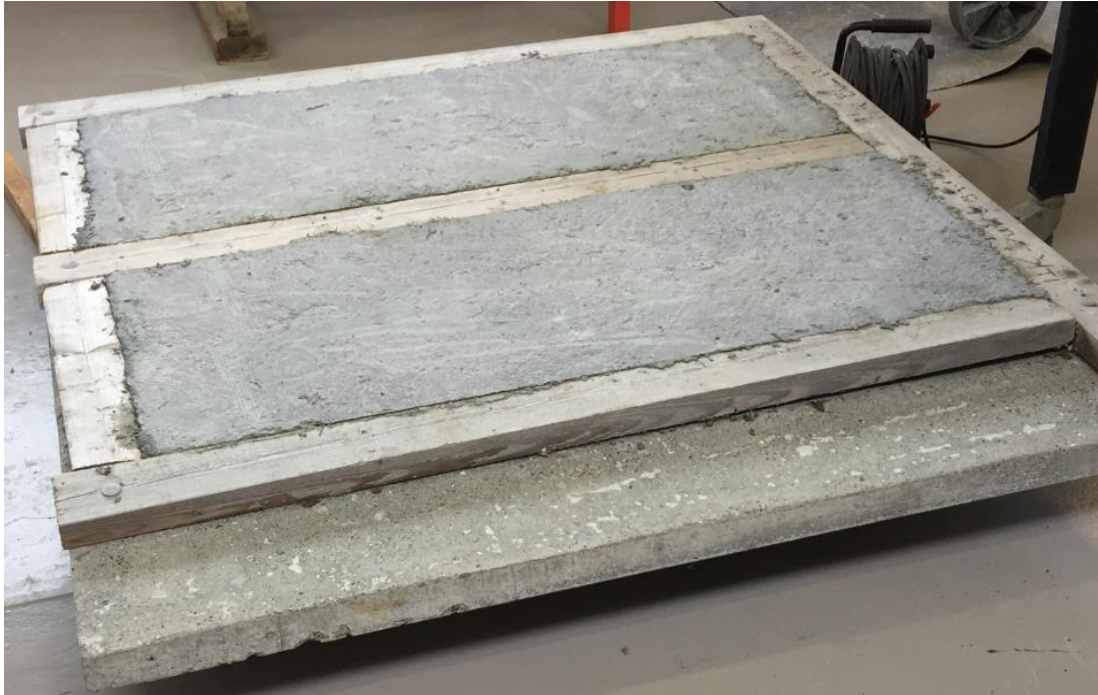
3.1.2 B2 - sérstakt steipt slitlag í þróun

Undir gr. 3.1.1 er yfirborðslag af gerðinni B2 tilgreint. Á síðasta ári eða 2016 var unnið að þróun staðsteypst slitlags á brýr 40 – 50 mm þykku, sem fellur undir skilgreiningu B2 í greininni hér á undan, í samvinnu Vegagerðarinnar og NMI (Nýsköpunarmiðstöð Íslands), þar sem NMI annast rannsóknarþáttinn. Í byrjun voru gerðar prufusteypur byggðar upp með mismunandi hætti hvað varðar, fylliefni, kornakúrfur, sementsmagn, stál- og plasttrefjar, íblendi, steyputæknilaga eiginleika o.s.frv. Í framhaldinu voru blöndur valdar til nánari rannsókna. Rýrnun þessara blanda reyndist ~ 0,5 mm / 1000 mm.

Slitþolið var mælt með Prall slitþolsprófi skv. [ÍST EN 12697-16^{\(14\)}](#) (sjá einnig [Viðauka 1 í Efnisrannsóknum og Efniskröfum^{\(15\)}](#)) og var á bilinu 17 - 19, en í eldri rannsóknum, sem unnar voru á NMI á árunum 2014 til 2016, mældist slitþol með Prall slitlagsprófi á bilinu 12 – 22 (lægra gildi – meira slitþol). Hér þarf sérstaklega að hafa í huga, að í eldri blöndunum var hámarksstærð fylliefna á bilinu 22 - 24, en í verkefninu með 40 – 50 þykka staðsteypa slitlaginu, sem hér um ræðir, er unnið með hámarkskornastærðir fylliefna 16 mm. Við það að minnka kornastærðina verður að reikna með að slitþolið verði lakara. Þrýstistyrkur í öllum þessum verkefnum hefur verið um og yfir 100 MPa.

Markmið rannsókna var að hanna blöndur með mikið veðrunar- og slitþol og litla rýrnun. Hár þrýstistyrkur var ekki markmið í sjálfu sér.

Í byrjun september 2016 voru síðan steiptar 6 prufusteypur 40 – 50 mm þykkar úr þróuðu blöndunum ofan á gamlar steiptar plötueiningar, stærð sýna; breidd * lengd * þykkt; 500 * 1300 * 45 mm. Í blöndurnar voru notuð annars vegar fylliefni úr Harðakambi og hins vegar frá Litla Horni. Ýmist var steipt ofan á tveggja þátta lím eða yfirborð án líms, rakt eða þurrt. Að rúmum mánuði liðnum voru sýnin flutt inn í hús, þar sem hlutfallslegi rakinn er mun lægri eða á bilinu 30 – 40% í stað 60 – 90% utan húss og áraunin á sýnin því meiri. Tvö sýni voru steipt ofan á hverja grunnplötu eins og fram kemur á [Mynd 28](#).



Mynd 28, myndin lýsir fyrirkomulaginu

Í Töflu 2 hefur rýrnunin verið reiknuð skv. Model Code 2010⁽⁵⁾ fyrir mismunandi hlutfallslegan raka. Rýrnunin er sýnilega mun meiri innanhúss eða í aðstæðum sambærilegum þeim sem sýnin voru sett í rúmlega mánaðar gömul. Samkvæmt aftasta dálkinum kemur skýrt fram hversu hratt dregur úr rýrnuninni með tímanum.

Tími í dögum	Hlutfallslegur raki	Rýrnun á mm / m	Hlutfallsleg breyting fyrir sömu tímalengd (90 dagar) og sama hlutfallslegan raka
90	30%	$4,08 \cdot 10^{-1}$	
90	60%	$3,42 \cdot 10^{-1}$	
90	90%	$1,62 \cdot 10^{-1}$	
180	30%	$5,26 \cdot 10^{-1}$	~29%
180	60%	$4,38 \cdot 10^{-1}$	~28%
180	90%	$2,0 \cdot 10^{-1}$	~23%
270	30%	$5,90 \cdot 10^{-1}$	~12%
270	60%	$4,89 \cdot 10^{-1}$	~12%
270	90%	$2,19 \cdot 10^{-1}$	~10%
360	30%	$6,30 \cdot 10^{-1}$	~7%
360	60%	$5,23 \cdot 10^{-1}$	~7%
360	90%	$2,31 \cdot 10^{-1}$	~5%

Tafla 2, rýrnun sem fall af hlutfallslegum raka

Að u.þ.b. 8 mánuðum liðnum eða í byrjun maí 2017 voru engar sprungur sýnilegar og kjarnar teknir og togaðir til þess að fá gildi fyrir viðloðun:



Mynd 29, prufusteypur úr fylliefnum frá Litla Horni steypar á þurrt yfirborð eða tveggja þátta lím

Viðloðunargildin voru eftirfarandi (viðloðun við þurrt yfirborð sleppt, enda 0 MPa):

Platti	Fylliefni	Undir- búningur flatar	Viðloðun 1 MPa	Viðloðun 2 MPa	Viðloðun 3 MPa	Viðloðun 4 MPa
A1	Harðikambur	Bleytt yfirb.	3,51	3,85	3,85	3,73
B1	Litla Horn	Bleytt yfirb.	3,73	3,62	3,51	3,62
B2	Harðikambur	Epoxy lím	4,98	4,53	3,06	4,19
C1	Litla Horn	Epoxy lím	4,30	4,75	3,96	4,35

Tafla 3, viðloðun 40 – 50 mm slitsterkrar steypu við undirlag

Ath.: Rauðmerkta gildið vîkur óeðlilega mikið frá öðrum gildum.

Til samanburðar er toggildi steypu C40/50, $f_{ctm} = 3,5$ MPa, þannig að viðloðunin er mjög góð og ræðst í þessu tilviki líklega af togstyrk undirliggjandi steypu. Skv. þessum mælingum eykur epoxy límið viðloðunina um á bilinu 15 – 30%.

Til gamans má geta þess, að ef það gleymdist að hreinsa steypu af skóflum, sem notaðar voru í slitsterkar steypur Borgarfjarðarbrúar, að verki loknu, þá reyndist erfitt eða útilokað að hreinsa af þeim daginn eftir að sögn brúarsmiða. Þetta rýmar vel við há gildi í [Töflu 3](#).

Sýnin voru síðan sett út aftur að rúmum 8 mánuðum liðnum og þegar þau voru skoðuð um miðjan september 2017, þá rúmlega árgömul, voru engar sprungur sjáanlegar. Sú ályktun er því dregin, að niðurstaðan lofi mjög góðu og álitlegt sé að fara með aðferðina upp á næsta stig eða stærri flöt.

Kostir þessa lags umfram malbik eru mun meira slitþol ef tekið er mið af Vesturlandsvegi upp í Kollafjörð, steypur um eða upp úr 1977, eða á bilinu 40 – 60 ár samanborið við 6 – 12 ár í malbiki. Syðsta akrein Brúar á Arnarneshæð var endurgerð 2013 – eða eftir 23 ár eins og komið hefur fram, en þar er mikil umferð og upphaflega steypan ekki hönnuð sérstaklega m.t.t. slitþols.

Notast má við tiltölulega einfaldan tækjabúnað við gerð slitlaga t.d. 40 – 50 mm lagsins og blanda slitþolna steypu á staðnum í svokallaðri truckasteypu, en flytja þarf slitsterk fylliefni á staðinn úr hæfum námum ásamt öðrum efnunum í blönduna. Truckasteypa var verkefni sem



Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar styrkti og var fyrst notuð í raunsteypu í slitlagi Blöndubrúar.

Gallinn er hins vegar sá, að ef lagið springur mikið þvert á það sem rannsóknin virðist benda til, og það myndast einnig los / heftibrestur í lagskilum milli ásteypulagsins og undirlagsins, þá er hætt við að vatn og salt komist milli laga, sjá [Mynd 45](#). Í framhaldinu veitir það burðarvirkinu ekki sömu yfirborðsvörn og malbik ásamt þéttilagi, sem er viðhaldið. Það gæti jafnvel virkað neikvætt ef svo fer í þeirri merkingu, að salt og vatn getur unnið sitt niðurbrot hægt og hljótt milli laga. Sama á reyndar við um bilun eða skemmdir í þéttilagi undir malbiki.

Í inngangi er minnst á að í Norsku Brúahönnunarleiðbeiningunum, Håndbok 185 frá 2011 sé talað um að líma slitlagið ofan á yfirbygginguna. Steypt sérstakt slitsterkt lag er í sjálfu sér mjög þétt og þéttara en undirliggjandi steypa því v/s – talan (vatns / sements –tala) er mjög lág eða $\leq 0,3$. Líming getur út af fyrir sig aukið þéttleikann og er þannig ekki æskileg viðbót, ef undirliggjandi steypa er að losa sig við raka eða þorna út. Ef undirlagið sem steypt er á er á mikilli hreyfingu og það er tiltölulega þunnt, þannig að raki komist auðveldlega niður gæti e.t.v. komið til álita að nota lím.

Almennt ætti hins vegar að móta yfirborð nýrrar steypu, þannig að traust hefti og viðloðun myndist milli laga. Líklega er vandfundið betra yfirborð, en vatnsbrotið yfirborð, en í gr. 3.5.2 er fjallað um að forma yfirborðið með tilteknum hætti, sem kalla má takkað yfirborð og þar eru einnig útreikningar á skerflutningsgetu.

3.1.2.1 Tengsl 40 – 50 mm lagsins við slitlagasteypur skv. gr. 2.1.1 og Bæjarháls m.t.t. sprungna

Hönnun steypu í 40 – 50 mm slitlagið byggir á þeirri reynslu, sem fékkst við hönnun slitlagssteypu m.a. í Borgarfjarðarbrú eins og nefnt er í gr. 2.1.1 og þannig er um skyldleika að ræða. Slitlögin á Borgarfjarðar-, Sogs- og Blöndubrúum sem og Brú á Kjálkafjarðará voru öll járnbent eins og fram kemur í [Töflu 4](#), en hins vegar hvorki upphaflega slitlagið frá 1990 né slitlagið á syðstu akrein Brúar á Arnarneshæð frá 2013. Sama er að segja um 80 mm slitlag brúarinnar í Bæjarhálsi. Í gr. 2.1.1.6 er komist að þeirri niðurstöðu, að vegna heftibrots sem reynt er að skýra verði ekki fjallað nánar um Brú á Rauðalæk.

Brú	Járnending í langátt	Járnending í þverátt
Brú á Borgarfjörð	Ø10 – 150	Ø12 – 220
Brú á Sog við Prastarlund	Ø12 – 250	Ø16 – 133
Brú á Blöndu á Blönduósi	Ø10 – 150	Ø12 – 150
Brú á Arnarneshæð – slitlag frá 1990 og nýtt slitlag í syðstu akrein frá 2013	Ójárnbent, en stáltrefjar í steypu	Ójárnbent, en stáltrefjar í steypu
Brú í Bæjarhálsi 1994	Ójárnbent	Ójárnbent
Brú á Kjálkafjarðará	Stálmottur Ø7 og stáltrefjar	Stálmottur Ø7 og stáltrefjar

Tafla 4, járnending slitlaga í þremur brúum þar sem yfirborð var vatsbrotið

Steypa í ásteypulögum rýrnar eins og önnur steypa, en á því er byggt að það sé traust viðloðun og hefti milli gömlu steypunnar og ásteypulagsins og þar myndist ekki los á mörkum laga, sem er forsenda þess að sprungur annað hvort myndist ekki eða verði fínar, þegar ofar dregur í ásteypulagið. Sjá hjálagða gr. 7.3.4 úr [ICE/0706/012^{\(9\)}](#) í [Mynd 30](#).



7.3.4 Restraint at the point of maximum restrained strain and crack width

At the joint between the new and the old concrete a crack can only open if there is debonding at the joint, in the same way that debonding of reinforcement must occur to enable a crack to open. As a crack cannot open at the joint it may not be appropriate therefore to use the restraint at the joint to estimate the crack width.

Kheder [5, 6] has reported crack width profiles in walls on stiff foundations, indicating the height at which the maximum crack width occurs. Similarly, Anson et al [7] have reported the variation in restrained-strain in several uncracked walls and published restrained-strain contours from which the point of maximum restrained-strain may be estimated. A very clear trend is apparent, as shown in Figure 7 (Section 4.2) with the maximum value of restrained strain and crack width occurring at a height equal to about 10% of the length.

The fact that the maximum crack width does not occur at the joint is consistent with the basis for the revised approach for predicting crack width. Unless debonding occurs at the joint, while the restrained strain may be high, cracks cannot open. As the restraint reduces away from the joint, cracking may develop.

Mynd 30, gr. 7.3.4 úr ICE/0706/012⁽⁹⁾.

Hætta eykst að líkindum á því að sprunga opnast eftir því sem þykkt ásteypulagsins eykst í ljósi þess, sem segir í tilvitnaðri gr. í Mynd 30. Gerist það er hugsanlegt að hún verði grunn og nái ekki djúpt ofan í ásteypulagið. Þetta hefur hins vegar ekki verið rannsakað markvisst að svo komnu máli.

Sprungna, sem er grunn og jafnvel þó hún gangi að undirlaginu án þess að þar verði heftibrestur eða los ætti ekki að vera skaðleg enda er sprunguvíddin þá mjög lítil og vatn, salt og önnur skaðleg efni ættu ekki að komast á milli laga. Sjá lauslega skýringarmynd á Mynd 45 í gr. 5.2.

Út frá því, sem hér hefur verið rakið, er sú ályktun dregin, að að öðru jöfnu sé minni hættu á að sprunga opnast í þunnu ásteypulagi, 40 – 50 mm lagi, en þykkari slitlögum eins og þeim sem hafa verið lögð í Brúm á Borgarfjörð, Sog og Blöndu. Upphaflegt slitlag Arnarnesbrúar var 80 mm þykkt og endurgert í syðstu akreininni með 60 mm þykku slitlagi eins og komið hefur fram og loks var slitlag Brúar á Kjálkafjarðará 70 mm þykkt. Slitlag brúarinnar í Bæjarhálsi er 80 mm þykkt.

Ef það verður viðloðunar- eða heftibrestur milli ásteypulagsins og undirlagsins og það myndast los geta myndast víðar sprungur, og því víðari sem losið nær yfir stærra svæði. Ef þetta gerist virkar járnþvinging í laginu, ef hún er nægjanlega mikil, en hversu mikil þarf hún að vera?

Almenna reglan er að til þess að járnþvinging stýri sprungum, þ.e. hafi áhrif á vídd þeirra og fjarlægð á milli þeirra þurfi togstyrkur járnþvingingarinnar á áhrifasvæði járnþvingingarinnar í fyrsta lagi að vera meiri en togstyrkur steypunnar og í öðru lagi þurfa spennur í henni að vera lágar þannig að sprungurnar verði nettar og stutt á milli þeirra. Ef 85 mm lag er tekið sem dæmi úr steypu C80/95, þá er $f_{ctm} = 4,8$ MPa, ef ekki eru stál- og plasttrefjar í steypunni. Togstyrkur lagsins á 1 m lengd er þá $T = 85 * 1.000 * 4,8 = 408 * 10^3$ N. Til þess að hafa áhrif sem skipta máli á sprunguvíddir þarf flatarmál þvingingar í átt að $A_s \sim 408 * 10^3 / 250 = 1.632$ mm² eða $\varnothing 12 - 70$. Stál- og plasttrefjar auka togsstyrk steypunnar, þannig að auka þarf



flatarmál járnendingarinnar umfram það sem að framan greinir, ef þær eru til staðar, til þess að ná sömu áhrifum.

Það er því óraunhæft að setja járnendingu í lögin með það markmið að stýra sprungum eða sprunguvíddum eins og að framan er lýst, en frekar til þess að halda laginu saman. 40 – 50 mm lagið er hins vegar of þunnt fyrir járnendingu. Eins og fram kemur í gr. 2.1.1 hér að framan má segja að fram hafi komið sprungur í slitlögum þriggja brúa af fimm, þar sem slitlög hafa verið endurnýjuð með á ýmsan hátt sambærileguð aðferðum, (Brú á Rauðalæk undanskilin eins og rökstutt er í gr. 2.1.1.6):

Brú	Sprungulýsing
Brú á Borgarfjörð	Aðallega sprungur yfir langbitum, sem virðast stafa af mismunaálagi á akreinum, sjá Myndir 7 og 8 . Dæmi er um að sprungur hafi sést og horfið síðan aftur. Þversprungur hafa komið fram og stundum horfið jafharðan
Brú á Sog við Þrastarlund	Fínar þversprungur eru í báðum akreinum með fjarlægðinni ~ 600 – 1200 mm, sjá Mynd 14 . Langsprungur er ekki að sjá
Brú á Blöndu á Blönduósi	Fínar þversprungur eru í báðum akreinum með fjarlægðinni ~ 600 – 1200 mm, sjá Myndir 20 og 21 . Langsprungur er ekki að sjá
Brú á Arnarneshæð	80 mm þykka lagið frá 1990 var að sjá sprungulaus og yngra lagið frá 2013 nánast sprungulaust 2017_09_11, sjá Myndir 26 og 27
Brú á Kjálkafjarðará	70 mm þykkt slitlag steipt 2001 leit mjög vel út 2013

Tafla 5, sprungulýsing í slitlögum fimm brúa

Sprungumyndun í yfirborði Blöndubrúar og Sogsbrúar virðist fljótt á litið sambærileg eins og fram kemur í [Töflu 5](#). Í Sogsbrú var notað fylliefni frá Litla Horni, en fylliefni frá Harðakambi í Blöndubrú. Fylliefni frá Litla Horni eru nú nari en fylliefni frá Harðakambi, sem hefur áhrif á togþol steypu að öðru jöfnu. Sérstök samanburðarrannsókn NMI á steypum með fylliefnum frá annars vegar Harðakambi og hins vegar Litla Horni leiddi í ljós, að ekki var um marktækan mun að ræða hvað togþol varðar, sem er skýrt með áhrifum trefjanna.

Milli bita í miðhluta Sogsbrúar eru einingar og þegar búið var að vatnsbrjóta hafði ásteypulag þeirra verið þynnt og spurning er hvort það skipti máli hvað sprungur varðar, þ.e. að undirlagið geti ekki hindrað samdrátt slitlagsins. Dýpt sprunganna liggur ekki fyrir eins og áður hefur komið fram.

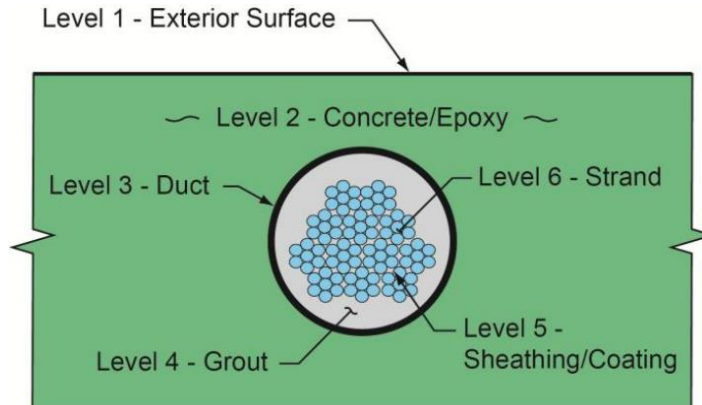
Það er komin 5 ára reynsla á elstu hluta slitlags Borgarfjarðarbrúar. Í ljósi þess hversu þunnt lagið er ætti stærstur hluti rýrnunar lagsins að vera kominn fram. Um skilin milli yfirbyggingar og ásteypulags hafa farið spennur af völdum hitabreytinga og álags auk áðurnefndrar rýrnunar. Ekkert bendir til þess að los hafi myndast milli laga á þessum 5 árum, sem er ekki letjandi þegar horft er til 40 – 50 mm slitlags, ef minni líkur eru á sprungum í þynnra lagi eins og rökstutt er hér fyrir framan.

Slitlag á syðstu akrein Brúar á Arnarneshæð er nánast ósprungið eftir 4 ár. Lagið er ~ 60 mm þykkt eins og áður hefur komið fram, þ.e. nokkru þynnra en lög hinna þriggja brúanna, og styður e.t.v. ályktunina hér að framan um að hugsanlega séu minni líkur á sprungum eftir því sem lagið er þynnra. Fyrir var 80 mm þykkt slitlag frá 1990 steipt strax í upphafi eins og komið hefur fram, sem enn er á hinum þremur akreinunum, og virðist ósprungið þegar þetta er skrifað og hafa staðið sig mjög vel. Þar sem lagið var steipt strax í upphafi hefur það, sem og skillagið (mörkin milli mismunandi laga) milli þess og burðarvirkisins, staðist álag frá skriði, rýrnun, hitabreytingum og notálagi eins og undirliggjandi burðarvirki. Sama á við um slitlag brúarinnar í Bæjarhálsi, sem var byggð 1994, en þar hefur ekki verið gert við slitlagið.

3.2 Marglaga pétting

Yfirborð yfirbyggingar er ekki aðeins slitlag heldur er hlutverk þess einnig að vernda undirliggjandi hluta burðarvirkisins, slakbendingu og ekki síst kapla eins og áður hefur komið fram. Mikilvægasta atriðið sem snýr að köplunum er að verja þá gegn ytri tærandi orsakavöldum eins og vatni, súrefni, loftbornu salti og vegsalti og sjá til þess að þeir sitri ekki inn í mannvirkið. Flutningsmiðillinn fyrir salt er háður samverkandi áhrifum vinds, vatns og hita.

Með það að leiðarljósi að vernda kaplana hefur hugmyndafræðin um marglagapéttingu verið sett fram og nokkrum þáttum hennar er lýst á [Mynd 31](#), sem er í riti [Federal Highway Administration](#)⁽¹⁾.



Mynd 31 – marglaga pétting skv. [Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual](#)

Á [Mynd 31](#) kemur fram, að litið er á yfirborðið sem varnarlag. Ef engin sérstök vörn er á yfirborði yfirbyggingar telst það vera án yfirborðsvarnar.

3.3 Áreitistig umhverfisins og yfirborðsvörn mannvirkisins

Í [fib Bulletin 33](#)⁽²⁾ er sett fram meðmæli og aðferðafræði til þess að meta áreitistig á mannvirkið eins og áður var minnst á og síðan í gr. 3.1.4 í [fib Bulletin 75](#)⁽³⁾ mat á vörnum, sem burðarvirkið veitir.

Mat á því hvert áreitistigið er má finna á [Mynd 32](#) úr [fib Bulletin 33](#)⁽²⁾:

Aggressivity levels	Class designation	Description of the environment	Informative examples where exposure classes may occur
Medium ↓ High	3 – Corrosion induced by chlorides other than from sea water		
	XD1	Moderate humidity	Concrete surfaces exposed to airborne chlorides
	XD2	Wet, rarely dry	Swimming pools Concrete exposed to industrial waters containing chlorides
	XD3	Cyclic wet and dry	Parts of bridges exposed to spray containing chlorides Pavements Car park slabs

Mynd 32 – mat á áreitistigi

Það fer varla á milli mála að áreitiflokkar margra brúa á Íslandi falla undir lýsinguna í [Mynd 32](#). Áreitistigið verður þá á bilinu „medium“ – „high“ skv. dálkinum lengst til vinstri.

Fara má með þá niðurstöðu og matið á yfirborðsvörn mannvirkisins skv. [Töflu 6](#) inn í myndræna framsetningu á varnarstigi í [Mynd 33](#), sem er að finna í [fib Bulletin 75](#)⁽³⁾. Áreitistigið við flestar brýr hér á landi er á bilinu „medium“ – „high“ eins og sagði og þá er spurningin hver yfirborðsvörnin er:

Varnarlag	Yfirborðs vörn mannvirkis	Nánari skýring
Engin sérstök yfirborðsvörn	Lítill	
Malbik og rakavörn sem er lítt eða ekki viðhaldið	Lítill	Ending rakavarnarlaga talin vera á bilinu 15 – 35 ár
Malbik og rakavörn sem er viðhaldið reglulega	Mikil	Reglulegt eftirlit og viðhald rakavarnarlagsins
Sérstakt steipt slitlag	Lítið	Sprungið þannig að los / heftibrestur hefur orðið í skillagi
Sérstakt steipt slitlag	Mikið	Óspungið eða fínar sprungur, þannig að los / heftibrestur hefur ekki orðið í skillagi

Tafla 6 – mat á yfirborðsvörn yfirbyggingar

Ef farið er með niðurstöðu úr Mynd 32 og Töflu 6 í Mynd 33 er ljóst, að varnarstig kapla þyrfti að vera PL2 eða PL3 hér á landi skv. meðmælum í fib Bulletin 33⁽²⁾ og fib Bulletin 75⁽³⁾.

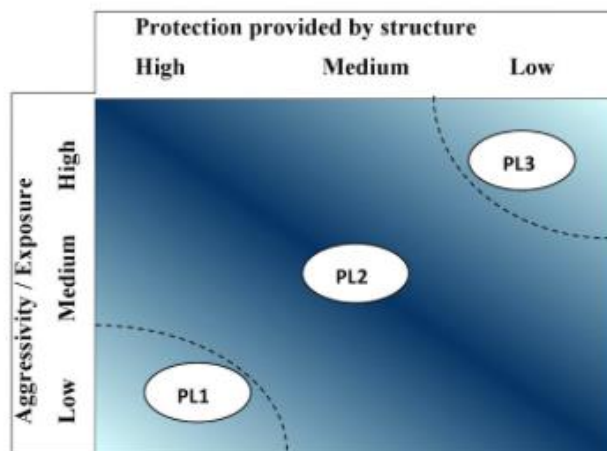


Figure 3.1: Protection Levels for post-tensioning tendons based on aggressivity/exposure versus protection provided by structure or member [fib 33 (2006)]

Mynd 33 – myndrænt val varnarstigs kapla út frá áreiti umhverfis / hversu útsett mannvirkið er og vörnum sem burðarvirkið veitir

Í rannsóknarverkefninu Ídráttarrör úr plasti, verksmiðjuframléiddur grautur⁽³⁾ segir:

„Horfa verður til þess annars vegar að brýr hér á landi eru í mismunandi miklu sjávarlofti og vegir eru margir hverjir saltaðir eða kunna að verða saltaðir. Hins vegar að þéttlög eru almennt ekki sett á brýr utan höfuðborgarsvæðisins og ef þau eru sett þarf að viðhalda þeim og endurnýja eftir þörfum. Ákvörðun breyta skv. gr. 2.2 og 2.3, þ.e. aðferðafræði fib Bulletin 75 og fib Bulletin 33, leiðir til varnarstigs PL2 fyrir brýr hér á landi í flestum tilvikum. Varnarstig PL3 væri sérstakt tilvik eins og staðan er í dag.“

Í varnastigi PL2 felst að nota ídráttarrör úr plasti (e: polymer).

Varnarstigin þrjú, PL1, PL2 og PL3 eru skilgreind í gr. 4 í fib Bulletin 33⁽³⁾ á eftirfarandi hátt, sjá Töflu 7:

Varnarstig (e: Protection level)	Skilgreining
Varnarstig PL1	PL1 er skilgreint sem ídráttarrör ásamt graut, sem veitir haldgóða vörn
Varnarstig PL2	PL2 er skilgreint sem PL1 að viðbættri vatnspéttri, ógagndræpum hjúp sem virkar sem þéttur tálmi
Varnarstig PL3	PL3 er skilgreindur sem PL2 að viðbættum möguleika á að vakta ástand kaplanna

Tafla 7 – skilgreining varnarstiga fyrir ídráttarrör



3.4 Vörn mismunandi yfirborðslaga

Malbik / malbikslög með rakavarnarlögum af gerð A3 skv. gr. 3.1.1, sem er reglulega viðhaldið, vermdar mannvirkið vel. Það er hins vegar að líkindum oft erfitt að ganga úr skugga um hvort rakavarnarlagið sé heilt og hætt við að viðhald þess og viðgerðir dragist á langinn, en líkleg ending er talin vera á bilinu 15 – 35 ár.

Skv. mælingum á klóríðinnihaldi í nokkrum brúm, [Eftirspennt brúargólf](#), [Klóríðinnihald í nokkrum steiptum brúargólfum](#)⁽⁴⁾, má draga þá ályktun að það taki langan tíma fyrir klórinn að ganga það langt inn í burðarvirkið að hætta stafi af. Þetta á við um ósprungna steypu. Sýnilegur munur var á dýptinni eftir því hvort og hversu lengi viðkomandi vegur / brú hafði verið söltuð og einnig verður að hafa í huga að ein hönnunarforsenda brúa í dag er 100 ára líftími, en sú krafa var sett fram í Evrópustöðlunum, en þeir tóku gildi hér á landi 2011.

Helstu leiðir fyrir vatn og þar með tærandi efni til þess að komast inn í burðarvirkið er um sprungur, sem gætu stafað af ýmsum ástæðum, sem verða ekki raktar hér. Teygjanlegt þéttilag, sem er vel við haldið er eina aðferðin af þeim sem fjallað er um hér á eftir, sem getur viðhaldið þéttleika mannvirkisins, ef sprungur myndast eftir að þéttilaginu er komið fyrir.

Steipt slitlag getur lokað sprungum í yfirborðinu, sem myndast áður en því er komið fyrir, en líklega ekki almennt öðrum sprungum. Þetta er orðað með þessum hætti, því að því er virðist getur sementsríkt slitlag að einhverju leyti lokað sprungum aftur sem myndast í laginu. Þetta er kallað sjálfþétting (e: autogenes healing eða self healing).

Eins og áður hefur komið fram ver yfirborðslag af gerðinni A3 skv. gr. 3.1.1 yfirbygginguna nokkuð örugglega vel, ef eftirlit er með ástandinu á því og því vel við haldið, en áhrif sérstaks steipts slitlags hafa ekki verið rannsökuð. Áhrif þess eru því matskennd í [Töflu 8](#). Í [Töflu 8](#) hér á eftir er sett fram mat á þeim kostum, sem hér eru til umfjöllunar:

Slitlag á yfirborði	Vörn gegn sprungum sem myndast áður en slitlaginu er komið fyrir	Vörn gegn sprungum sem myndast eftir að slitlaginu er komið fyrir
Ekkert	-	-
Steipt slitlag	++	-
Malbik með teygjanlegu þéttilagi, sem er viðhaldið	++	++
Malbik með óvissu viðhaldi á teygjanlegu þéttilagi	+	- til +

Tafla 8 – þéttigeta slitlaga í yfirborði yfirbygginga

3.5 Áhrif hitabreytinga, skriðs og rýrnunar, sniðkraftar

Umferðin markar sín spor í slitlagið og slítur því með tímanum. Slitlagið er einnig fyrsta vörn yfirbyggingar gegn sólarhita og frost- þíðu áhrifum. Yfirbyggingin sjálf þenst út eða dregst saman af völdum hitabreytinga og hún skriður undan álagi kaplanna og rýrnar.

Slitlagið þarf ekki aðeins að þola sem best slit af völdum umferðar þ.m.t. negldra hjólbarða, frost- þíðuáhrifa og sólarljóss því fleira kemur til:

- Hreyfingar yfirbyggingar af völdum hitabreytinga (mannvirkið hitnar – þenst út og kólnar – dregst saman), en þær eru í hlutfalli við brúarlengdina og á við um bæði nýjar og gamlar brýr
- Skrið og rýrnun steypunnar og samdráttur af þeim völdum
- Sniðkraftar og spennur af þeim völdum dreifast á allt sniðið og þ.á.m. skillagið milli burðarvirkis yfirbyggingarinnar og slitlagsins

Hreyfingar af völdum hitabreytinga, skriðs og rýrnunar eru umtalsverðar í t.d. 300 m langri nýrri brú reiknað skv. MC2010 eins og hjálögð Tafla 9 ber með sér. Hreyfingar í hvorum enda eru helmingur af neðanskraðu, ef brúnni er haldið fyrir miðju:

Orsök	Samdráttur yfirbyggingar í mm							
	60 dagar	360 dagar	1800 dagar	3600 dagar	7200 dagar	10.800 dagar	18.000 dagar	36.000 dagar
Rýrnun	-24	-41	-66	-82	-100	-111	-124	-139
Skrið	-40	-64	-82	-89	-96	-100	-104	-110
Hitalækkun	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84	-84
	-148	-189	-232	-255	-280	-295	-313	-334

Tafla 9 – samdráttur í 300 m langri brú

Það er vel líklegt að steypit eða malbikað slitlag verði ekki lagt fyrir en eftir 1 – 3 mánuði frá því að ný brú er spennt og þannig hverfur hluti færslanna, en aðeins mjög lítil hluti þeirra.

3.5.1 Áhrif á slitlag úr malbiki

Malbik er með lágan fjaðurstuðul, þannig að það formbreytist einfaldlega eftir hreyfingum yfirbyggingarinnar, hvort sem um samdrátt eða lengingu er að ræða. Það er því ekki líklegt til að valda neinum vandkvæðum og reynslan hér á landi styður þá ályktun.

3.5.2 Áhrif í skilum burðarvirkis og steypis 40 – 50 mm slitlags

Eins og lesa má úr Töflu 9 eru umtalsverðar hreyfingar á langri brú. Slitlagið tekur upp þversniðskrafta í hlutfalli við styrk þess eftir að það hefur verið steypit. Kraftar af ýmsum orsökum flytjast milli burðarvirkis og slitlagsins um skerspennur á mörkum laganna.

Eiginleikar steypis slitlags og burðarvirkis eru ekki þeir sömu, en í Töflu 10 er samanburður nokkurra eiginleika:

	Þrýstistyrkur MPa	Grunn skerþol $\tau_{Rd} = 0,25 * \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c}$ MPa	Rýrnun mm / 1000 mm	Fjaðurstuðull GPa
Steypa í burðarvirki	35 / 45 – 45 / 55	0,37 - 0,45	0,5 – 1,0	27 - 29
Steypa í slitlagi	80 / 95 – 100 / 115	0,56 – 0,61	~ 0,5	34 - 37

Tafla 10 – samanburður nokkurra eiginleika steypu í yfirbyggingu og slitlagi

Steypa í slitlagi er örugglega mun þéttari en í burðarvirkinu að öðru leyti vegna lágrar v/s – tölu (vatns / sements – tala), rannsóknargildi liggja ekki fyrir, en hún er talin vera ~ 100 falt þéttari.

Um skerspennu í snertifletinum á mörkum þessara laga má t.d. fylgja útreikningum í ÍST EN 1992-2⁽⁷⁾ og Designers' Guide to EN 1992-2⁽⁸⁾.

2-1-1/clause 6.2.5(1) specifies that the interfaces should be checked to ensure that $v_{Edi} \leq v_{Rdi}$, where v_{Edi} is the design value of shear stress in the interface and v_{Rdi} is the design shear resistance at the interface.

The applied design value of shear stress is given by:

$$v_{Edi} = \beta V_{Ed} / z b_i \quad 2-1-1/(6.24)$$

where:

β is the ratio of the longitudinal force in the new concrete area and the total longitudinal force either in the compression or the tension zone, both calculated for the section considered

V_{Ed} is the total vertical shear force for the section

z is the lever arm of the composite section

b_i is the width of the interface shear plane (2-1-1/ Fig. 6.8 gives examples)

Reikna má β út, en það er íhaldsamt og á öruggu hliðinni að velja $\beta = 1,0$. Skerspennan fæst úr eftirfarandi jöfnu:

The shear stress is then obtained by dividing by the thickness at the interface to give:

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{z b_i} \quad (D6.2-17)$$

Skerspennupolið í sniðinu er metið skv. eftirfarandi jöfnu:

The design shear resistance at the interface is based on the CEB Model Code 90⁶ provisions and is given in 2-1-1/clause 6.2.5(1) as:

$$v_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5 \nu f_{cd} \quad 2-1-1/(6.25)$$

where c and μ are factors which depend on the roughness of the interface.

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} * \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} = 1,0 * \frac{f_{ctk,0,05}}{1,5}$$

Ef steypa er C35/45 er $f_{ctk,0,05} = 2,2$ og $f_{ctd} = 1,47$ MPa

Ef steypa er C40/50 er $f_{ctk,0,05} = 2,5$ og $f_{ctd} = 1,67$ MPa

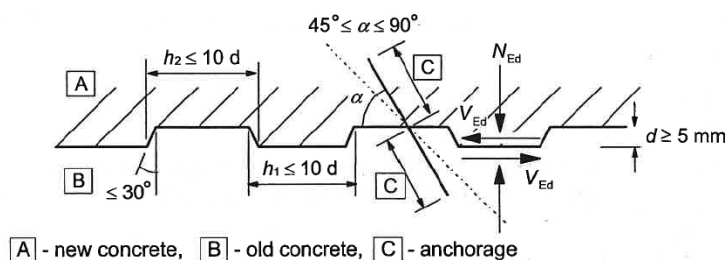
Ef steypa er C45/55 er $f_{ctk,0,05} = 2,7$ og $f_{ctd} = 1,80$ MPa

$\sigma_n = 0,045 * 0,025 = 0,0011$ MPa, af völdum slitlagsins

$\rho = 0$ því það er engin járnending milli laganna

Gildi fyrir c og μ :

- Gróft yfirborð með a.m.k. 3 mm mishæðum / nibbum með 40 mm millibili, sem fengið er með því að raka yfirborðið, háþrýstipvo það þannig að fylliefnið sjáist eða með sambærilegum aðferðum, $c = 0,4$ og $\mu = 0,7$
- Takkað yfirborð skv. eftirfarandi mynd, $c = 0,5$ og $\mu = 0,9$:





$$v = 0,6 * \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

Ef steypustyrkur er C35/45 er $f_{ck} = 35$ og $v = 0,52$ MPa

Ef steypustyrkur er C40/50 er $f_{ck} = 40$ og $v = 0,50$ MPa

Ef steypustyrkur er C45/55 er $f_{ck} = 45$ og $v = 0,49$ MPa

Þegar liðir sem telja ekki hafa verið felldir út lítur jafna 6.25 þannig út:

$$v_{Rdi} = c * f_{ctd} + \mu * \sigma_n \leq 0,5 * v * f_{cd}$$

Ef steypustyrkur er C35/45 og yfirborðið með 3 mm mishæðum fæst:

$$v_{Rdi} = 0,4 * 1,47 + 0,7 * 0,011 = 0,60 \leq 0,5 * 0,52 * \frac{35}{1,5} = 6,07 \text{ MPa}$$

Ef steypustyrkur er C40/50 og yfirborðið með 3 mm mishæðum fæst:

$$v_{Rdi} = 0,4 * 1,67 + 0,7 * 0,011 = 0,68 \leq 0,5 * 0,50 * \frac{40}{1,5} = 6,6 \text{ MPa}$$

Ef steypustyrkur er C45/55 og yfirborðið með 3 mm mishæðum fæst:

$$v_{Rdi} = 0,4 * 1,80 + 0,7 * 0,011 = 0,73 \leq 0,5 * 0,49 * \frac{45}{1,5} = 7,35 \text{ MPa}$$

Ef steypustyrkur er C35/45 og yfirborð takkað fæst:

$$v_{Rdi} = 0,5 * 1,47 + 0,9 * 0,011 = 0,74 \leq 0,5 * 0,52 * \frac{35}{1,5} = 6,07 \text{ MPa}$$

Ef steypustyrkur er C40/50 og yfirborð takkað fæst:

$$v_{Rdi} = 0,5 * 1,67 + 0,9 * 0,011 = 0,85 \leq 0,5 * 0,50 * \frac{40}{1,5} = 6,6 \text{ MPa}$$

Ef steypustyrkur er C45/55 og yfirborð takkað fæst:

$$v_{Rdi} = 0,5 * 1,80 + 0,9 * 0,011 = 0,91 \leq 0,5 * 0,49 * \frac{45}{1,5} = 7,35 \text{ MPa}$$

Samandregið á töfluformi lítur þetta þannig út:

Steypustyrkur MPa	Grunn skerþol $\tau_{Rd} = 0,25 * \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c}$ MPa	c	μ	v_{Rdi} MPa	c	μ	v_{Rdi} MPa
C35/45	0,37	0,4	0,7	0,6	0,5	0,9	0,74
C40/50	0,42	0,4	0,7	0,68	0,5	0,9	0,85
C45/55	0,45	0,4	0,7	0,73	0,5	0,9	0,91

Tafla 11 – útreikningur á v_{Rdi} fyrir mismunandi yfirborð og steypustyrk

Útreiknuð gildi eru hærri en grunnskerþolið og af því er sú niðurstaða dregin, að verulega háar spennur geti farið um skillagið (mörkin milli mismunandi laga).



4. Kostnaður, núvirtur kostnaður

4.0 Almenn

Hér að framan hefur verið minnst á meðmæli [fib Bulletin 33^{\(2\)}](#) og [fib Bulletin 75^{\(3\)}](#) hvað varðar yfirborðsvörn yfirbygginga og varnarstig ídráttarröra. Myndræn lýsing á viðgerðum þriggja brúa hefur verið sett fram án þess að nefna kostnað, sem augljóslega er mjög hár. Fjallað hefur verið um yfirborðslög út frá [Háðnbok R762, Prosesskode 2^{\(6\)}](#) sem og [Háðnbok 185^{\(10\)}](#) og hvaða aðferðir sem þar eru nefndar hafi verið notaðar hér á landi í gr. 3.1.1, sem og þróun sérstaks steypis 40 – 50 mm slitlags í gr. 3.1.2.

Ljóst er, að skv. meðmælum [fib Bulletin 33^{\(2\)}](#) og [fib Bulletin 75^{\(3\)}](#) ætti að vera yfirborðsvörn á Íslensum brúm og ídráttarrör í flokki PL2 eða PL3 sbr. gr. 3.3, en í því sambandi þarf einnig að horfa til sléttleika yfirborðs brúa í ljósi vaxandi umferðar og ekki síst ferðamanna allt árið eins og minnst hefur verið á áður. Að öðru jöfnu og m.t.t. aksturseginnleika er æskilegt þar sem umferðarhraði er mikill, að slitlag sömu gerðar sé í veginum og yfirborði brúar eins og einnig hefur komið fram áður. Úti á landi er hins vegar nánast ávallt klæðning á vegum, þannig að ekki er mögulegt að uppfylla þessa kröfu og þetta liti þá þannig út eins og áður hefur komið fram:

- malbik á veg- og brúaryfirborði
- klæðning á vegyfirborði og steypa eða malbik í brúaryfirborði

Mikilvægt er að vita hver kostnaðurinn er við mismunandi aðferðir slitlagagerðar og í því sambandi nægir ekki að reikna stofnkostnað heldur þarf að áætla núvirtan kostnað yfir líftíma mannvirkisins. Það er nokkuð ljóst, að á Reykjavíkursvæðinu muni nýjar brýr vera með slitlag úr malbiki og e.t.v. á það sama við um brýr á og nálægt Akureyri o.e.t.v. fleiri þéttbýlisstöðum.

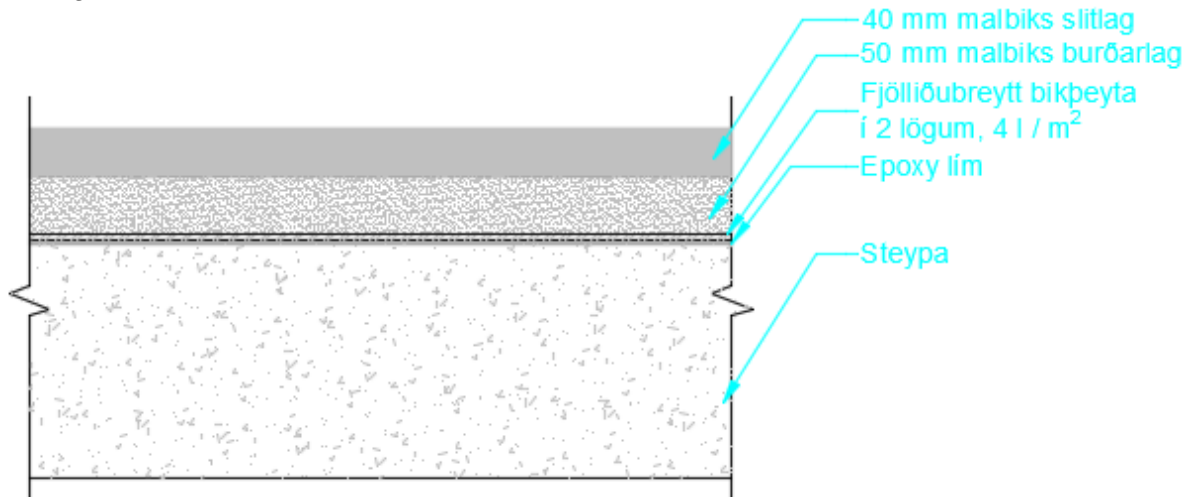
Í þessu sambandi skiptir máli að vita hvort og hvaða kostnaðaraukning felst í gerð burðarvirkisins vegna aukins eiginþunga af völdum slitlags. Þetta var skoðað og fjallað um hér á eftir í gr. 4.4.

Kostnaður og núvirtur kostnaður er reiknaður fyrir slitlög úr malbiki og steypit 40 – 50 mm slitlag. Gert er ráð fyrir 100 m langri brú í 200 km fjarlægð frá Reykjavík, 10 m breiðri og breidd milli bríka 9 m.

4.1 Malbiks slitlag

Uppbygging slitlagsins – 2 malbikslög:

Á Mynd 34 er tillaga úr gögnum frá KTH (e: Royal Institute of Technology) og ljóst að uppbyggingin er oft mun flóknari háð reynslu veghaldara og þar með dýrari og þá væntanlega endingabetri.



Mynd 34 – 2 malbikslög

Forsendur núvirðisútreiknings:

- Í útreikningum á núvirtum kostnaði er miðað við 3,5% vexti
- Slitlagsmalbikið endurnýjað á 10 ára fresti og fræst 30 mm niður í lagið í hvert sinn
- Ending þéttilagsins er áætluð 40 ár og því þarf að endurnýja það ásamt malbikslögunum báðum á 40 ára fresti til þess að tryggja að yfirborðið sé þétt
- Verðlag í september 2017

Upphafskostnaður:

Efnisliður	Eining	Magn	Einingarverð	Verð
Flutningur malbikunarvélar og valtara báðar leiðir	km	800	550	440.000
Rakavarnarlag	m ²	900	7.500	6.750.000
Efniskostnaður 50 mm malbiks burðarlags	t	100	20.000	2.000.000
Efniskostnaður 40 mm malbiks slitlags	t	80	20.000	1.600.000
Flutningur malbiks burðarlags og slitlags 200 km	t * km	36.000	75	2.700.000
Útlögn 2*9*100=1.800 m ²	m ²	1.800	500	900.000
Samtals				14.390.000

Endurgerð slitlags á 10 ára fresti:

Efnisliður	Eining	Magn	Einingarverð	Verð
Flutningur malbikunarvélar og valtara báðar leiðir	km	800	550	440.000
Flutningur fræsara	km	400	550	400.000
Fræsing 30 mm slitlags og brottflutningur efnis	m ²	900	2000	400.000
Efniskostnaður 30 mm malbiks slitlags	t	60	22.000	1.320.000
Útlögn 9*100 = 900	m ²	900	500	450.000
Samtals				3.010.000



Endurgerð allra laga á 40 ára fresti:

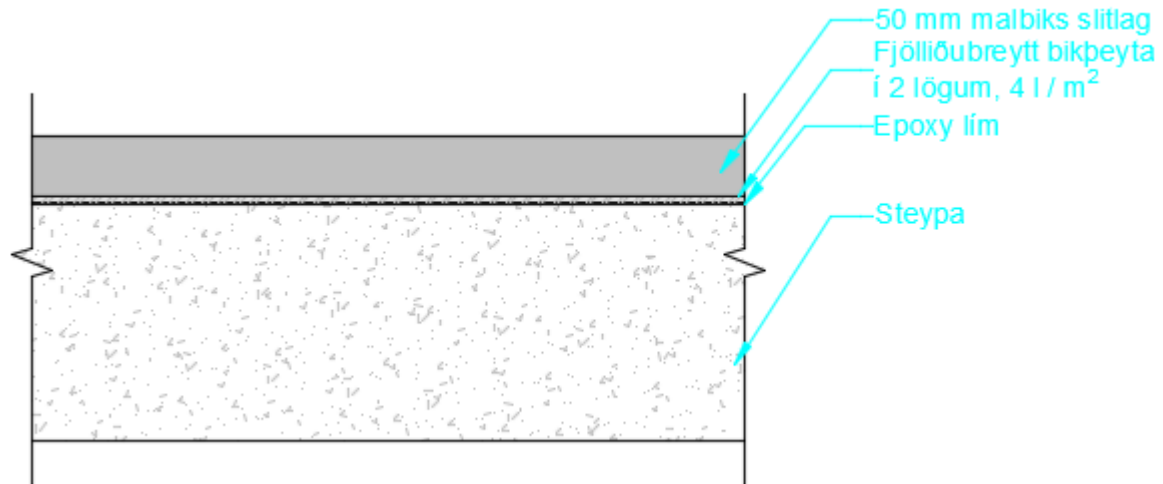
Efnisliður	Eining	Magn	Einingarverð	Verð
Flutningur malbikunarvélar og valtara báðar leiðir	km	800	500	400.000
Flutningur fræsara	km	400	500	200.000
Fræsing 90 mm burðarlags og slitlags ásamt brottflutningi efnis	m ³	900	4.000	3.600.000
Rakavarnarlag	m ²	900	7.500	6.750.000
Efniskostnaður 50 mm malbiks burðarlags	t	100	20.000	2.000.000
Efniskostnaður 40 mm malbiks slitlags	t	80	20.000	1.600.000
Flutningur malbiks burðarlags og slitlags 200 km	t * km	36.000	75	2.700.000
Útlögn 2*9*100=1.800 m ²	m ²	1.800	500	900.000
Samtals				18.150.000

Núvirtur kostnaður yfir ~ 100 ára líftíma, 3,5% vextir:

Kostnaðarliður	Kostnaður	Núvirtur kostnaður
Upphafskostnaður	14.390.000	14.390.000
Viðhaldskostnaður eftir 10 ár	3.010.000	2.133.846
Viðhaldskostnaður eftir 20 ár	3.010.000	1.512.723
Viðhaldskostnaður eftir 30 ár	3.010.000	1.072.398
Endurgerð eftir 40 ár	18.150.000	4.584.190
Viðhald eftir 50 ár	3.010.000	538.951
Viðhald eftir 60 ár	3.010.000	382.072
Viðhald eftir 70 ár	3.010.000	270.858
Endurgerð eftir 80 ár	18.150.000	1.157.840
Viðhald eftir 90 ár	3.010.000	136.124
Viðhald eftir 100 ár	18.150.000	581.891
Kostnaður á hverjum tíma	89.910.000	
Núvirtur kostnaður		26.760.894

Uppbygging slitlagsins – 1 malbikslag:

Einöfðuð útfærsla fyrri malbiks tillögunnar er á [Mynd 35](#):



Mynd 35 – 1 malbikslag

Upphafskostnaður:

Efnisliður	Eining	Magn	Einingarverð	Verð
Flutningur malbikunarvélar og valtara báðar leiðir	km	800	550	440.000
Rakavarnarlag	m ²	900	7.500	6.750.000
Efniskostnaður 50 mm malbiks slitlags	t	100	20.000	2.000.000
Flutningur malbiks burðarlags og slitlags 200 km	t * km	36.000	75	2.700.000
Útlögn 2*9*100=1.800 m ²	m ²	1.800	500	900.000
Samtals				12.790.000

Endurgerð slitlags á 10 ára fresti:

Efnisliður	Eining	Magn	Einingarverð	Verð
Flutningur malbikunarvélar og valtara báðar leiðir	km	800	550	440.000
Flutningur fræsara	km	400	550	400.000
Fræsing 30 mm slitlags og brottflutningur efnis	m ²	900	2000	400.000
Efniskostnaður 30 mm malbiks slitlags	t	60	22.000	1.320.000
Útlögn 9*100 = 900	m ²	900	500	450.000
Samtals				3.010.000

Endurgerð allra laga á 40 ára fresti:

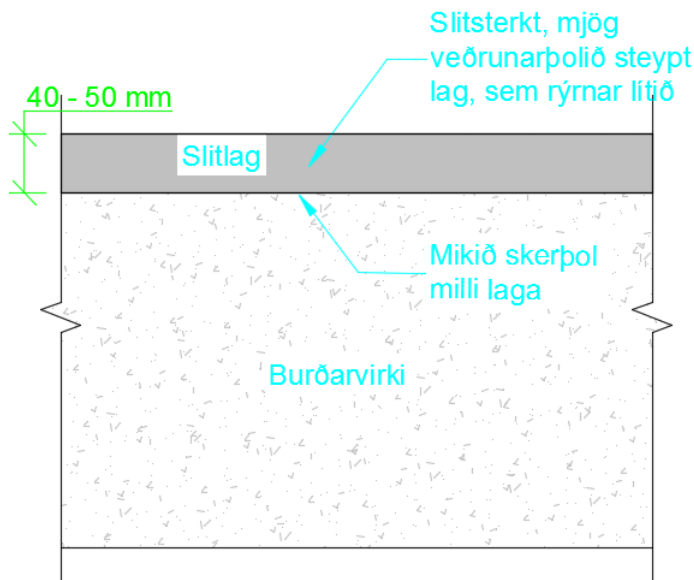
Efnisliður	Eining	Magn	Einingarverð	Verð
Flutningur malbikunarvélar og valtara báðar leiðir	km	800	500	400.000
Flutningur fræsara	km	400	500	200.000
Fræsing 90 mm burðarlags og slitlags ásamt brottflutningi efnis	m ³	900	4.000	3.600.000
Rakavarnarlag	m ²	900	7.500	6.750.000
Efniskostnaður 50 mm malbiks slitlags	t	100	20.000	2.000.000
Flutningur malbiks burðarlags og slitlags 200 km	t * km	36.000	75	2.700.000
Útlögn 2*9*100=1.800 m ²	m ²	1.800	500	900.000
Samtals				16.550.000

Núvirtur kostnaður yfir ~ 100 ára líftíma, 3,5% vextir:

Kostnaðarliður	Kostnaður	Núvirtur kostnaður
Upphafskostnaður	12.790.000	12.790.000
Viðhaldskostnaður eftir 10 ár	3.010.000	2.133.846
Viðhaldskostnaður eftir 20 ár	3.010.000	1.512.723
Viðhaldskostnaður eftir 30 ár	3.010.000	1.072.398
Endurgerð eftir 40 ár	16.550.000	4.180.074
Viðhald eftir 50 ár	3.010.000	538.951
Viðhald eftir 60 ár	3.010.000	382.072
Viðhald eftir 70 ár	3.010.000	270.858
Endurgerð eftir 80 ár	16.550.000	1.055.772
Viðhald eftir 90 ár	3.010.000	136.124
Viðhald eftir 100 ár	3.010.000	96.501
Kostnaður á hverjum tíma	69.970.000	
Núvirtur kostnaður		24.169.319

4.2 40 – 50 mm staðsteypd slitlag

- Í útreikningum á núvirtum kostnaði er miðað við 3,5% vexti
- Gert er ráð fyrir að yfirborð yfirbyggingar verði með takkaðri áferð eins og lýst er í gr. 3.5.2
- 40 – 50 mm lag verði steypd ofan á burðarvirkið án þess að líma það
- Lagið eða 40 mm af því verði fræst í burt eftir 40 ár og svo 80 ár og það endurnýjað



Mynd 36 – 40 – 50 mm staðsteypd slitlag



Upphafskostnaður:

Efnisliður	Eining	Magn	Einingarverð	Verð
Harðakambsefni í 50 mm þykkt lag	m ²	900	2.770	2.493.000
Flutningur Harðakambsefnis 200 km í 50 mm þykkt lag	m ²	900	600	540.000
Sement í 50 mm þykkt lag	m ²	900	1.012	910.800
Flutningur sements 200 km í 50 mm þykkt lag	m ²	900	131	117.900
Plasttrefjar í 50 mm þykkt lag	m ²	900	114	102.600
Stáلتrefjar í 50 mm þykkt lag	m ²	900	431	387.900
Prókon íblöndunarefni í 50 mm þykkt lag	m ²	900	231	207.900
Premia 196 þjálnefni í 50 mm þykkt lag	m ²	900	267	240.300
Flutningur trefja og íblendis	m ²	900	89	80.100
Leiga steypubíls í útlögn 50 mm þykkis lags	m ²	900	310	279.000
Akstur steypubíla á staðinn	m ²	900	266	239.400
Múrverk	m ²	900	533	479.700
Vinna brúarvinnuflokks	m ²	900	1.604	1.443.600
Sérfræðivinna	m ²	900	1.111	1.000.000
Samtals				8.522.200

Endurgerð á 40 ára fresti:

Efnisliður	Eining	Magn	Einingarverð	Verð
Flutningur fræsara	km	400	500	200.000
Fræsing 40 mm slitlags og brottflutningur efnis	m ²	900	2.500	2.250.000
Harðakambsefni í 40 mm þykkt lag	m ²	900	2.220	1.998.000
Flutningur Harðakambsefnis 200 km í 40 mm þykkt lag	m ²	900	478	430.200
Sement í 40 mm þykkt lag	m ²	900	809	728.100
Flutningur sements 200 km í 40 mm þykkt lag	m ²	900	105	94.500
Plasttrefjar í 40 mm þykkt lag	m ²	900	91	81.900
Stáلتrefjar í 40 mm þykkt lag	m ²	900	345	310.500
Prókon íblöndunarefni í 40 mm þykkt lag	m ²	900	184	165.600
Premia 196 þjálnefni í 40 mm þykkt lag	m ²	900	213	191.700
Flutningur trefja og íblendis	m ²	900	89	80.100
Leiga steypubíls í útlögn 40 mm þykkis lags	m ²	900	258	232.200
Akstur steypubíla á staðinn	m ²	900	266	239.400
Múrverk	m ²	900	533	479.700
Vinna brúarvinnuflokks	m ²	900	1.604	1.443.600
Sérfræðivinna	m ²	900	1.111	1.000.000
Samtals				7.475.500

Núvirtur kostnaður yfir ~ 100 ára líftíma, 3,5% vextir:

Kostnaðarliður	Kostnaður	Núvirtur kostnaður
Upphafkostnaður	8.522.200	8.522.200
Endurgerð eftir 40 ár	7.475.500	1.888.105
Endurgerð eftir 80 ár	7.475.500	476.883
Kostnaður á hverjum tíma	23.473.200	
Núvirtur kostnaður		10.887.189

4.3 Kostnaður vegnotenda

Þegar unnið er að viðgerðum geta þeir sem leið eiga um svæðið þurft að bíða á umferðarstýrðum ljósum og í sumum tilvikum e.t.v. að taka á sig krók, ef um einbreiðar brýr er að ræða. Í þessu felst kostnaður, sem fellur á notendur vegarins (e: road user cost).

Eftirfarandi er skv. [Techniques For Manually Estimating Road User Costs Associated With Construction Projects^{\(11\)}](#):

ROAD USER COST APPLICATIONS IN TEXAS

“Road user cost” (RUC) is defined as the estimated daily cost to the traveling public resulting from the construction work being performed. That cost primarily refers to lost time caused by any number of conditions including:

- detours and rerouting that add to travel time
- reduced roadway capacity that slows travel speed and increases travel time; and
- delay in the opening of a new or improved facility that prevents users from gaining travel time benefits.

Þessi hugsun er sett fram í [Mynd 37](#), sem eftirfarandi texti skýrir:

The straight lines at the bottom of the graph represent “Road User” and “Contract Administration” costs. These costs are time-related. The longer the project continues, the higher these costs. Therefore, the total cost of the project is the total of the construction, road user and contract administration costs. In this example, the lowest total project cost occurs at “B” working days.

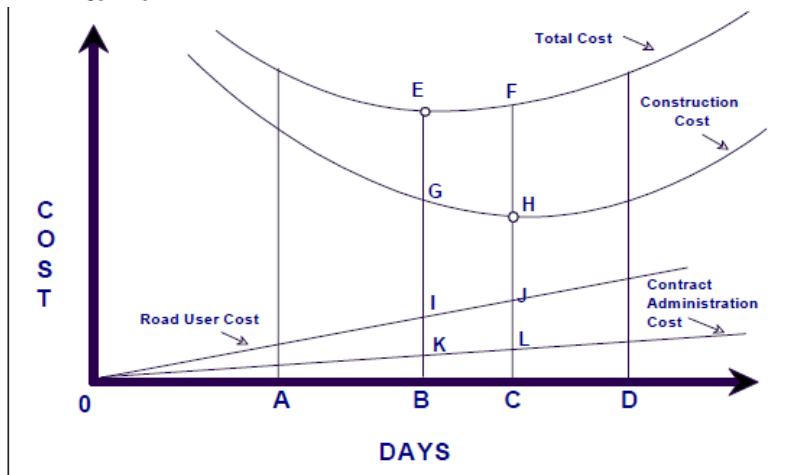


Figure A. Project Costs by Type, Related to Duration

Mynd 37 – heildarkostnaður skv. [Techniques For Manually Estimating Road User Costs Associated With Construction Projects^{\(11\)}](#)



Kostnaður vegnotenda á Borgarfjarðarbrú:

Viðgerð á yfirborði Borgarfjarðarbrúar hafa staðið yfir s.l. 5 ár og gjarnan unnið að tveimur höfum á ári. Meðalbiðtíminn er ekki fjarri 1 mínútu á umferðarstýrðum ljósum. Ef gengið er út frá því, að meðalumferðin sé 4.000 bílar á sólarhring, 1,3 farþegi sé í hverjum bíl og útseldur tími þeirra að meðaltali sé 5.000 kr. / klst. er kostnaður vegnotenda ~ 450.000 kr. / sólarhring eða ~ 32,5 milljónir á hver 2 höf að því gefnu, að verktíminn sé 2,5 mánuðir fyrir hver 2 höf.

Kostnaður vegnotenda á Sogsbrú:

Framkvæmdatíminn var frá 2. mars til 16. júní 2015 og ljósastýring var notuð frá 4. mars til 11. júní eða í ~ 100 daga. Miðað við ÁDU 3.000 og sömu forsendur og í Borgarfjarðarbrú að öðru leyti verður kostnaður vegnotenda ~ 340.000 kr. / sólarhring eða ~ 34 milljónir.

Kostnaður vegnotenda á Blöndubrú:

Framkvæmdatíminn var frá 9. ágúst til 31. jan 2017 og ljósastýring var notuð frá 16. ágúst til 30. janúar eða í ~ 170 daga. Miðað við ÁDU 1.600 og sömu forsendur og í Borgarfjarðarbrú að öðru leyti verður kostnaður vegnotenda ~ 180.000 kr. / sólarhring eða ~ 31 milljón.

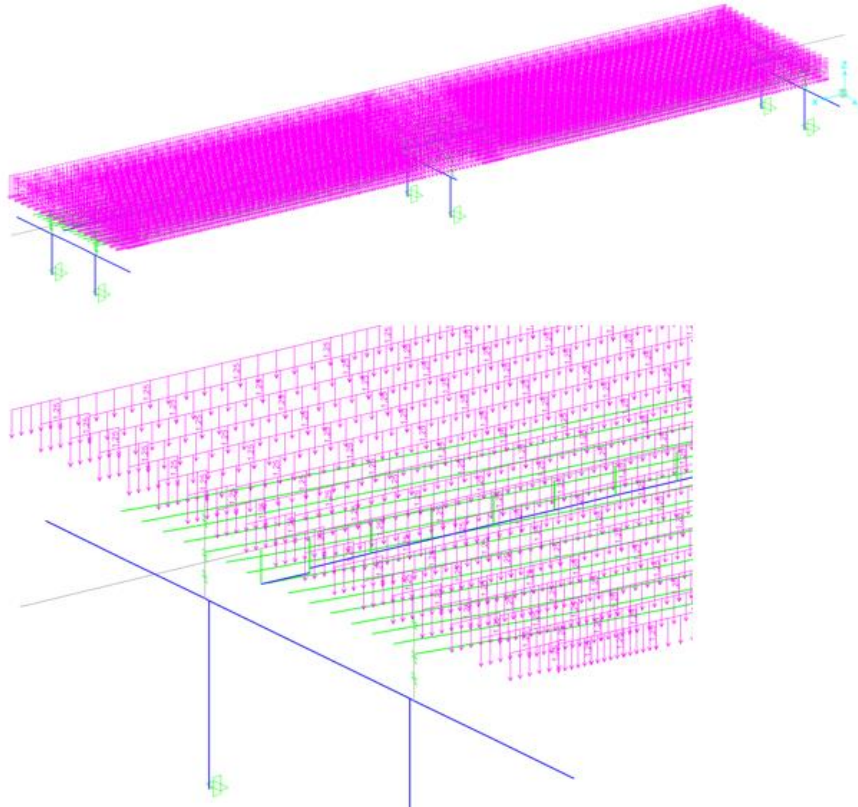
Slyshætta vegnotenda vegna viðgerða:

Þegar gert er við brúargólfín er umferð ljósastýrt á einni akrein. Í því felst viss hætta, sem hér er ekki reynt að meta. Hættan eykst eðlilega eftir því sem viðgerðartíminn er lengri.

4.4 Kostnaðaraukning burðarvirkis vegna slitlags

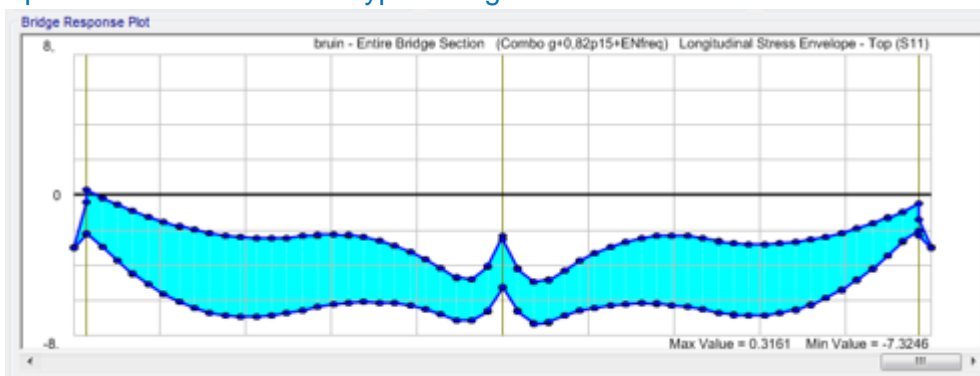
Til þess að fá mat á kostnaðaraukningu við gerð burðarvirkis vegna aukins eiginþunga af völdum slitlags voru tvær brýr skoðaðar annars vegar tveggja hafa brú og hins vegar þriggja hafa brú.

Hér á eftir eru sýndar niðurstöður fyrir tveggja hafa brú með jafndreifðu álagi yfir allan flötinn, sem jafngildir 50 mm steinsteyptu slitlagi, áætlað 1,25 kN/m²:

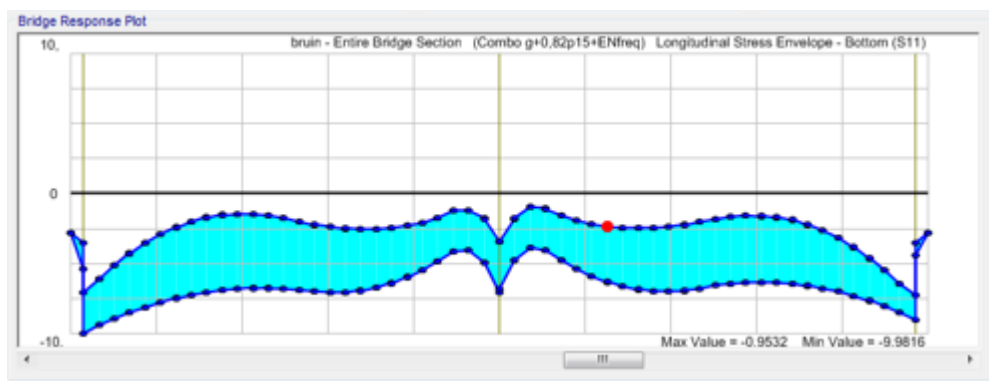


Mynd 38 – álagi, sem jafngildir þunga 50 mm steinsteypt slitlags var dreift yfir allan flötinn

Spennur án 50 mm steinsteypts slitlags:

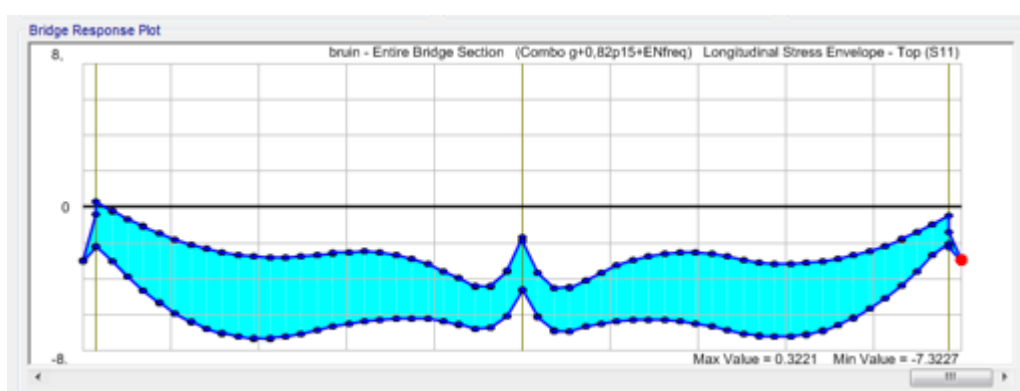


Mynd 39 – spennur í efri brún

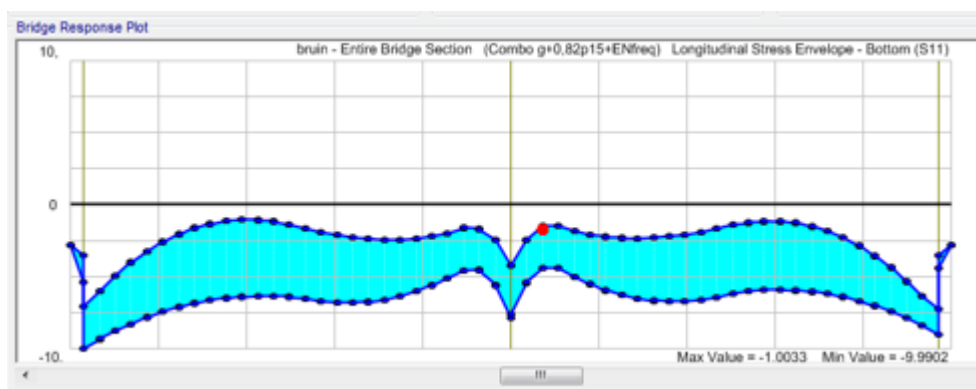


Mynd 40 – spennur í neðri brún

Spennur með 50 mm steinsteyptu slitlagi ofan á burðarvirkinu:



Mynd 41 – spennur í efri brún



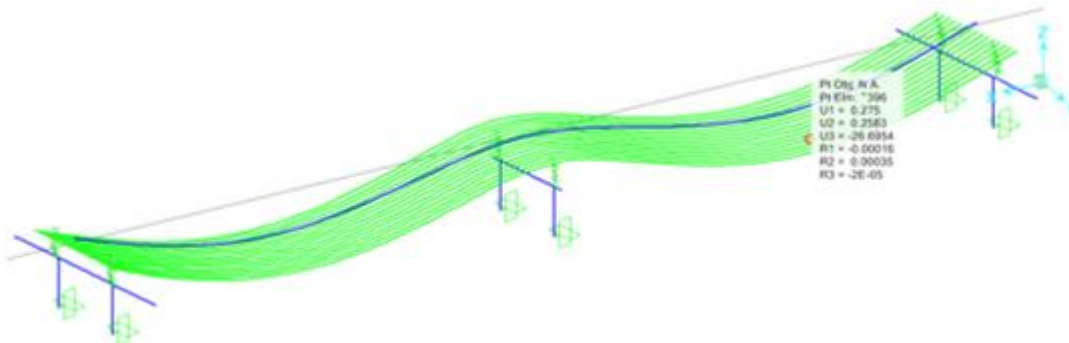
Mynd 42 – spennur í neðri brún

Samanburður á myndunum leiðir í ljós, að spennulega séð eru áhrifin hverfandi.

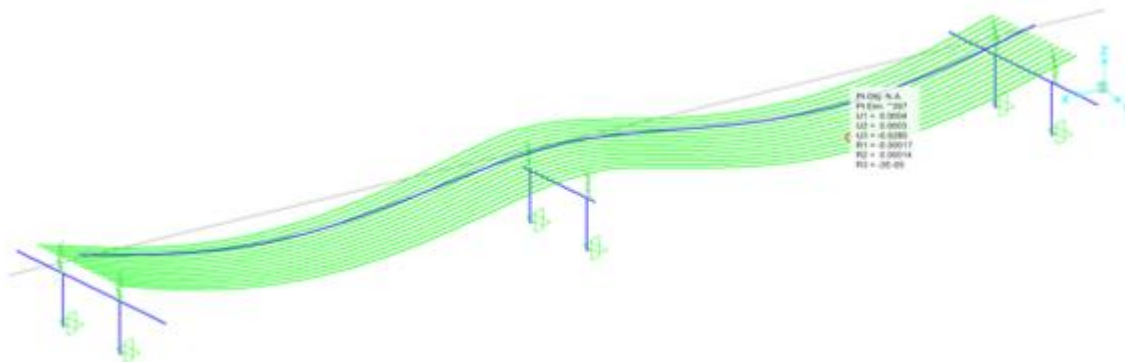
Niðurbeygja var einnig reiknuð með og án 50 mm steinsteypts slitlags:

Niðurstaða útreikninga:

- án steinsteypts 50 mm slitlags 26,7 mm
- með 50 mm steinsteyptu slitlagi 28,5 mm



Mynd 43 – niðurbeygja án 50 mm steinsteypts slitlags



Mynd 44 – niðurbeygja með 50 mm steinsteyptu slitlagi

Niðurstaða útreikninga:

Aukin eiginþungi af völdum 50 mm þykks steinsteypts slitlags leiðir ekki til aukins kostnaðar við gerð burðarvirkis, hvorki fyrir tveggja eða þriggja hafa brú.

Það gæti hins vegar leitt til óverulegrar kostnaðaraukningar í öðrum tilvikum t.d. bæta við kapli.

5 Til íhugunar og nánari skoðunar

5.1 Dæmi um viðgerðarkostnað

Hér á undan hefur verið fjallað um kostnað vegna mismunandi slitlaga og bent á að viðgerðir verði mun fljótgerðari, ef sérstök slitlög eru lögð. Það er því fróðlegt að vita, hver kostnaðurinn var við viðgerð Sogs-, Blöndu- og Borgarfjarðarbrúa. Taka verður fram að viðgerð á hlið Blöndubrúar undan straumi er ekki lokið og kostnaður vegna síðustu tveggja bíla Borgarfjarðarbrúar er ekki kominn fram. Kostnaðurinn er eftirfarandi á þessu stigi:

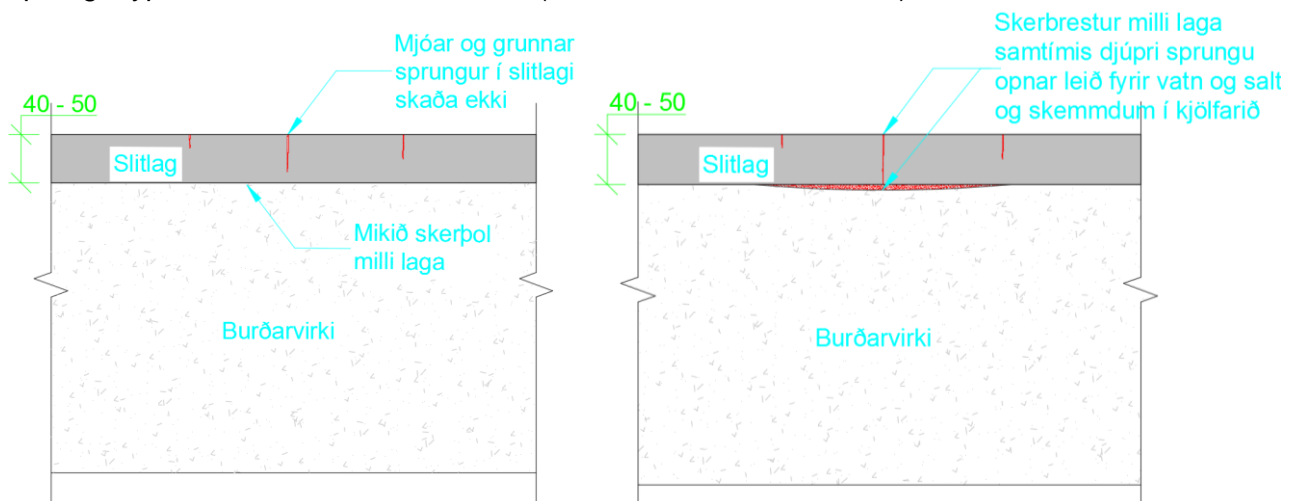
Brú á Sog við Þrastalund:	kr. 87 milljónir
Brú á Blöndu:	kr. 146 milljónir ⁽¹⁾
Brú á Borgarfjörð	kr. 449 milljónir ⁽¹⁾

⁽¹⁾ viðgerð er ekki lokið

Þá er ótalin kostnaður vegnotenda, sem fjallað er um í gr. 4.3 hér að framan og er óneitanlega hluti heildarkostnaðar.

5.2 Mæla sprungudýptir og sprunguvíddir

Sú ályktun er dregin í gr. 3.1.2.1 að grunn sprunga, jafnvel þó hún nái að undirlaginu, sé ekki skaðleg svo framarlega, sem það myndast ekki los í skillaginu, sem vatn og salt kemst inn í, sjá [Mynd 45](#). Í því ljósi er nærtækt að gera sprungudýptar og sprunguvíddar úttekt á þeim brúm, sem hér hafa verið til umræðu, þ.e. fara á staðinn og taka nokkra kjarna, mæla sprunguvíddir og sprungudýptir. Stáltrefjarnar valda því hins vegar, að aðferðir til að mæla sprungudýptir, sem ekki skemma frá sér (e: non destructive methods) virka ekki.



Mynd 45 – skaðlegar og óskaðlegar sprungur

5.3 Reynsla úr fyrri verkum og 40 – 50 mm rannsóknarverkefnið

Brúin á Arnarneshæð var byggð 1990 og yfir burðarvirkið var steipt sérstakt 80 mm þykkt slitlag og syðsta akreinin fræst upp og endursteypt með 60 mm þykku slitlagi 2013 eins og fram kemur í gr. 2.1.1.4. Rétt er að vekja athygli á, að slitlagið hefur staðist áraun á skilum milli slitlags og burðarvirkis vegna skriðs, rýrnunar og hitabreytinga. Það er ekki annað að sjá,

en að lausnin hafi heppnast mjög vel, enst afar vel og að því er virðist á það sama við um endurgerð slitlagsins á syðstu akreininni, sem unnið var 2013.

Þó ekki sé vitað til þess að gerð sérstaks steypis slitlags á Brúna á Arnarneshæð hafi verið hugsuð sem tilraun, er ljóst að í reynd hefur það verið lengsta samfellda tilraunin hér á landi með slíkt slitlag. Rétt er að vekja athygli á því, að þar var ekki notuð sérstök slitsterk steypa í upphafi eða steypa, sem rýrnar lítið eins og gert var í 40 – 50 mm rannsóknarverkefninu og í viðgerðinni á syðstu akreininni 2013.

Mislæga brúin í Bæjarhálsi var byggð 1994 með 80 mm þykku staðsteypu slitlagi og steypustyrk C80/95. Steypan virðist ekki hafa verið með stáltreffjum. Það er ekki annað að sjá en að slitlagið hafi komið vel út og sprungur er ekki að sjá, en sennilega gallar í framkvæmd nærri norðaustur enda sbr. [Mynd 48](#).



Mynd 46 – Bæjarháls



Mynd 47 – Svólítið slit



Mynd 48 – Gallar í framkvæmd?



Í gerð slitlagsins felst, að ekki er aðeins gert sérstakt lag, sem umferðin vinnur á heldur verndar slitlagið undirliggjandi mannvirki, sér í lagi kaplana og er einn liður marglaga þéttingar eins og fjallað er um í gr. 3.2. Í ljósi þess hversu vel hefur til tekist og því sem fram hefur komið í greinunum hér á undan, þá er óheppilegt að þessi aðferð hafi ekki verið reynd á öðrum mannvirkjum en þessu tveimur eins og einnig er minnst á í gr. 2.1.1.4.

Slitlag á Brú á Kjálkafjarðará, sem fjallað er um í gr. 2.1.1.5, er sambærilegt, þ.e. virðist hafa staðið sig mjög vel, en burðarvirkið í þeirri brú er slakbent og slitlagið lagt yfir, þegar brúin var komin til ára sinna. Þykkt slitlagsins þar er 70 mm.

Burðarkerfi Brúar á Borgarfjörð, Sog við Þrastarlund og á Blöndu eru mismunandi:

- Brú á Borgarfjörð: Bitar yfir eitt haf og ekki neikvætt vægi
- Brú á Sog við Þrastarlund: Plata miðjuhluta steyppt ofan á einingar, 3 höf – jákvætt og neikvætt vægi
- Brú á Blöndu: Heil plata, 3 höf, jákvætt og neikvætt vægi

Sprungur hafa komið fram í yfirborði þessara þriggja brúa, en það er ekki þar með sagt að þær séu skaðlegar, sjá gr. 5.2.

Minnst fer fyrir sprungum í Brú á Borgarfjörð, stundum sjást þær og hverfa svo aftur. Hugsanlegt er að burðarkerfið eigi sinn þátt í því, þ.e. þar er aðeins jákvætt vægi eins og fram kemur hér á undan, þannig að það myndast ekki tog í slitlaginu af völdum undirbyggingarinnar.

Steypan í slitlagi 40 – 50 mm rannsóknarverkefnisins hefur komið mjög vel út, engar sprungur eftir ~ 1 ár, þrátt fyrir að sýnin hafi verið sett inn í þurrara umhverfi eða með lágum hlutfallslegum raka í ~ 7 mánuði þar af, eins og fram kemur í gr. 3.1.2

Af því sem fram hefur komið er sú ályktun dregin, að mjög góðar líkur séu á, að 40 – 50 mm steyppt rýrnunarlítið slitlag muni virka eins og til er ætlast, en um það er eigi að síður ekki talið rétt að fullyrða almennt því forsendur kunna að vera mismunandi.

Forsendan er, að steypan sé úr slitsterkum fylliefnum, blandan í heild sé mjög frostþolin og rýrnun innan við 0,5 mm / 1.000 mm, sem er um þriðjungur af rýrnun algengra steypublanda hér á landi og loks hátt viðloðunargildi og heftiþol í skillaginu, þ.e. mörkunum milli burðarvirkis og slitlags.



5.4 Gera FEM reiknilíkan af steypu slitlagi ásamt burðarvirki

Eins og fram hefur komið hefur ytra álag af ýmsum toga áhrif á spennur í skillaginu milli slitlags og undirbyggingar. Eftir að slitlagið er steyppt ofan á undirbygginguna á slitlagið ásamt undirbyggingunni að virka sem ein heild. Slitlagið er með aðra eiginleika, hærri steypustyrk, hærri fjaðurstuðul, það er þéttara - áætlað ~ 100 sinnum þéttara o.s.frv. Á þetta virka hitabreytingar, skrið, rýrnun, rakabreytingar og notálag. Til álita kemur að gera FEM (Finite Element Method, smástykkja aðferð) reiknilíkan af kerfinu til þess að reyna að gera sér nánari mynd af því sem er að gerast. Það yrði hins vegar að vera framhaldsverkefni þessa verkefnis.

Reikna verður með, að þrátt fyrir að til gerðar reiknilíkans komi verði einhverjum spurningum enn ósvarað.



5.5 Samanburður og umfjöllun

Viðgerðarkostnaður skv. bókhaldi:

Brú á Sog við Þrastalund: kr. 87 milljónir að frátöldum kostnaði vegnotenda

Brú á Blöndu: kr. 146 milljónir að frátöldum kostnaði vegnotenda, viðgerð ekki lokið, þ.e. hluta undir gangbraut undan straumi

Brú á Borgarfjörð kr. 449 milljónir að frátöldum kostnaði vegnotenda, viðgerð tveggja bíla nú í haust ekki meðtalin (tölur liggja ekki fyrir)

Í **Töflu 12** er kostnaður settur fram á mismunandi vegu:

	Brú á Blöndu	Brú á Sog við Þrastalund	Brú á Borgarfjörð
	Byggð 1964 Viðgerð 2015 Viðgerðar lengd 81,8 m	Byggð 1983 Viðgerð 2016 Viðgerðar lengd 84 m	Byggð 1979 Viðgerð 2013 – 2017 Viðgerðar lengd 520 m
	Milljónir kr.	Milljónir kr.	Milljónir kr.
Viðgerðarkostnaður skv. bókhaldi	146 ⁽¹⁾	87	449 ⁽¹⁾
Viðgerðarkostnaður á verði byggingaárs miðað við 3,5% vexti	25 ⁽¹⁾	28	130 ⁽¹⁾
Kostnaður vegnotenda á viðgerðartíma	31 ⁽²⁾	34 ⁽²⁾	179 ⁽²⁾
Kostnaður Vegagerðarinnar og vegnotenda á viðgerðartíma	146 + 31 = 177	87 + 34 = 121	449 + 179 = 629
Kostnaður Vegagerðarinnar og vegnotenda á verði byggingaárs	25 + 5 = 30	39	130 + 52 = 182
Viðgerðarkostnaður skv. bókhaldi umreiknaður í 100 m brú án kostnaðar vegnotenda	178 ⁽¹⁾	104	102 ⁽¹⁾
Viðgerðarkostnaður skv. bókhaldi umreiknaður í 100 m brú án kostnaðar vegnotenda á verði byggingaárs	31 ⁽¹⁾	33	29 ⁽¹⁾
Viðgerðarkostnaður skv. bókhaldi að meðtöldum kostnaði vegnotenda umreiknað í 100 m brú	216 ⁽¹⁾	144	142 ⁽¹⁾
Viðgerðarkostnaður skv. bókhaldi að meðtöldum kostnaði vegnotenda umreiknað á 100 m brú á verði byggingaárs	37 ⁽¹⁾	46	41 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ viðgerð er ekki lokið

⁽²⁾ kostnaður vegnotenda skv. gr. 4.3

Tafla 12 – viðgerðarkostnaður, kostnaður vegnotenda o.fl.

Til samanburðar við útreikninga í **Töflu 12** er útreikningur á núvirtum kostnaði slitlaga í 100 ár skv. gr. 4.1. og 4.2 fyrir 100 m brú í 200 km fjarlægð frá Reykjavík:

Þéttilag og 2 lög malbiki: ~ 27 milljónir kr.

Þéttilag og 1 lag af malbiki: ~ 24 milljónir kr.

40 – 50 mm þykkt steypitlag ~ 11 milljónir kr.



Bókfærður viðgerðarkostnaður er afar hár í öllum tilvikum og þó vantar enn hluta kostnaðar vegna Brúar á Blöndu og Brúar á Borgarfjörð eins og getið er um.

Það er ljóst að með sérstökum slitlögum hefði kostnaðurinn verið mun lægri. Ein aðferðin til þess að meta það er að bera saman kostnað skv. neðstu línunni í [Töflu 12; Viðgerðarkostnaður skv. bókhaldi að meðtöldum kostnaði vegnotenda umreiknað í 100 m brú á verði byggingárs,](#) við tölurnar á eftir töflunni. Þar sker lágur kostnaður vegna 40 – 50 mm þykkis steipt slitlags sig úr.

Sérstakt staðsteipt slitlag er lang ódýrasti kosturinn og líklegt að munurinn aukist eftir því sem fjarlægðir aukast.

Viðgerðarkostnaður brúa, sem hér hafa verið kallaðar „hefðbundinna aðferðin“ er það hár, að það er ekki álitamál að velja ber að byggja brýr með sérstöku slitlagi, en mismunandi lausnir henta á hverjum stað, þ.e. malbik í 1 eða 2 lögum eða 40 – 50 mm steipt slitlag. Þetta á einnig við um brýr sem eru í farvegi, þ.e. undirbúningi, útboði og jafnvel búið að semja um

Þá eru enn ótaldir tæknilegir kostir brúa með slitlögum umfram „hefðbundnar brýr“ eins og fjallað er nánar um hér á eftir.

[Í reynd er það þannig og verður að segja alveg skýrt, að með því að halda sig við „hefðbundna aðferðina“ er verið að velta kostnaði yfir á framtíðina.](#)

Mikilvægt er að hafa í huga í samanburði gilda í [Töflu 12](#) við útreiknaðan kostnað mismunandi útfærslu slitlaga, að tæknilegir kostir eða eiginleikar eru ekki þeir sömu eins og fjallað hefur verið um í greinunum hér á undan frá mismunandi sjónarmiðum og er tekið saman í stuttu máli hér á eftir.

[Mikilvægustu tæknilegu þættirnir, sem hafa verið nefndir eru:](#)

- [með sérstöku slitlagi fæst sléttara yfirborð og betri aksturseiginleikar og þar með aukið öryggi vegfarenda ekki síst vegna þess að varmarýmd vegkropps er almennt meiri en brúar, þannig að hálf myndast fyrr á brú](#)
- [með sérstöku slitlagi er komið fyrir varnarlagi í yfirborði brúar, sem verndar undirliggjandi burðarvirki, sérstaklega kapla og bendingu – sérstakt slitlag hefði þannig verndað Blöndubrú gegn frostniðurbroti hefði það verið raunhæft, þegar hún var byggð.](#)
- [sérstakt slitlag er þannig liður í marglaga þéttingu eins og lýst er í gr. 3.2, sem felst í því, að þegar einn þáttur bilar tekur annar við og stuðlar að löngum líftíma](#)

Áður hefur verið nefnt, að þar sem umferðarhraði er mikill er æskilegt að sama efni sé í veg- og brúaryfirborði. Þegar komið er út á land er oftast um klæðningu að ræða á vegum, þannig að þessi krafa yrði sjaldan uppfyllt. Þetta liti þá þannig út:

- malbik á veg- og brúaryfirborði
- klæðning á vegyfirborði og steypa eða malbik á brúaryfirborði

Vegagerðin stendur nú frammi fyrir því í hverri brúnni á fætur annarri, sem gerð var með aðferð, sem hér hefur verið nefnd "hefðbundna aðferðin", að gera þarf við brúargólf, þar sem slitlagið

er efsti hluti burðarvirkisins. Viðgerðarkostnaðurinn er hár þó kostnaður vegnotenda sé undanskilinn eins og ofangreind dæmi bera með sér.

Á [Mynd 49](#) hér fyrir neðan er dæmi um sprungur vegna hitamyndunar í steinsteypunni, sem hafa myndast vegna ófullnægjandi hitastýringar. [Mynd 50](#) sýnir frágang loftunarventla frá köplum, sem er t.d. ekki eins og [State of Florida, Department of Transportation^{\(13\)}](#) og [Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual^{\(16\)}](#) mælir með og er í þremur þrepum og sýndur á [Mynd 51](#).

Í báðum nefndum tilvikum mundi slitlag, sem er viðhaldið draga úr líkum á skaða á undirliggjandi burðarvirki.



Mynd 49 – Sprungur vegna ónógrar hitastýringar



Mynd 50 – frágangur sem gæti a.m.k. verið betri

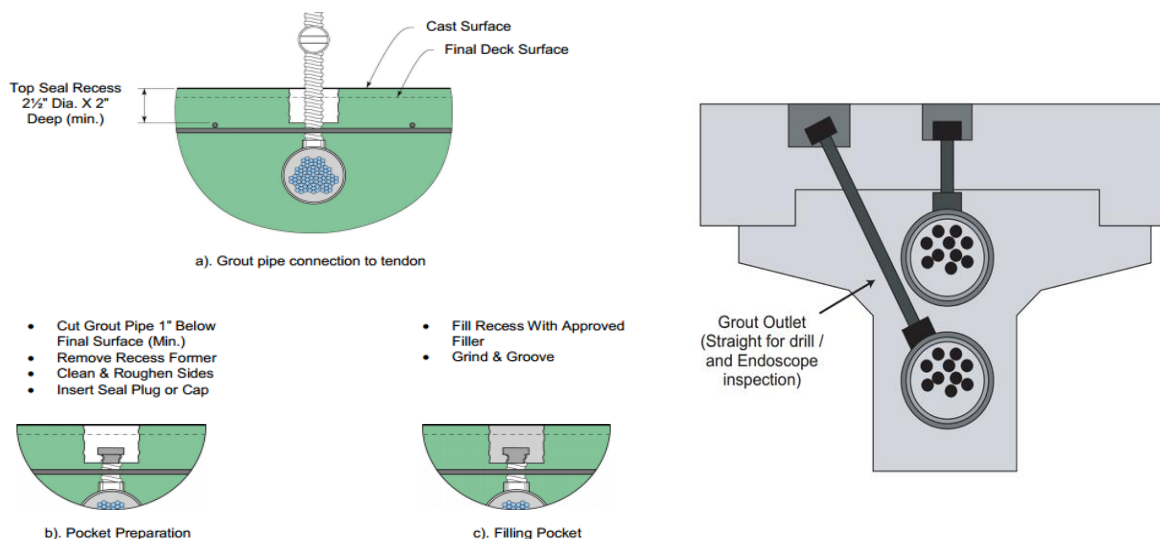


Figure 6.1 – Sealing grout ports and vents in top slabs.

Mynd 51 – frágangur skv. State of Florida og PTTI and Grouting Manual

Hér að framan hefur verið rökstutt að hvort sem litið er til kostnaðar eða tæknilegra eiginleika beri að velja að byggja brýr með sérstöku slitlagi, en gerð þess ræðst af aðstæðum á hverjum stað og fjarlægð frá malbikunarstöð.

5.6 Dæmi um slitlagalausnir annarra þjóða

Til upplýsingar eru hjálögð dæmi um slitlagalausnir fjögurra ríkja úr; [Asphalt pavement on bridge decks](#) ⁽¹²⁾, sem allar byggja á malbiki.

Þýskar lausnir:

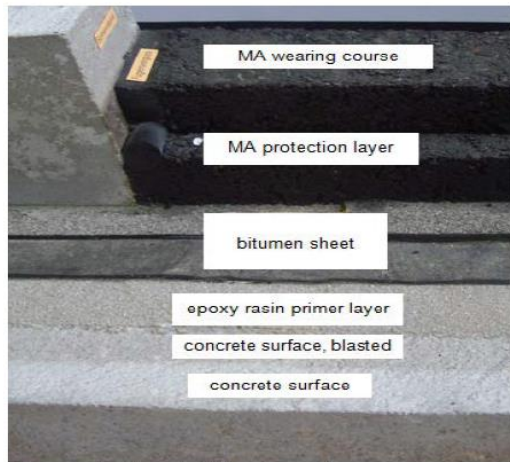


Figure 1: Type 1- Waterproofing layer with bitumen sheet

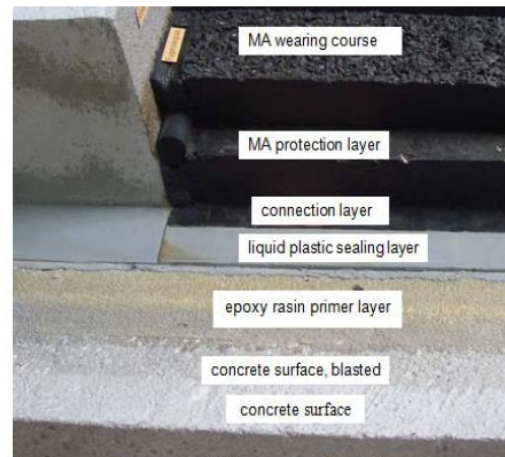


Figure 2: Type 2- Waterproofing layer with liquid plastic Sealing

Mynd 52– þýskar lausnir

Sænskar lausnir:

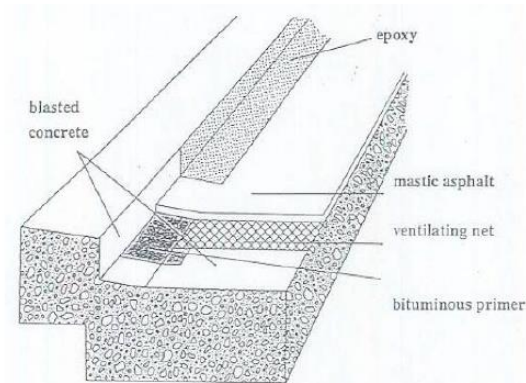


Figure: 1
Waterproofing system with mastic asphalt

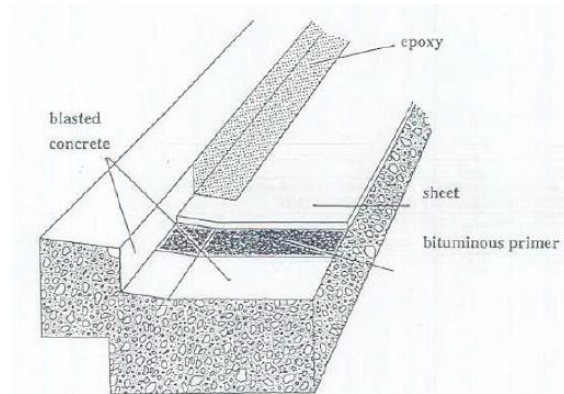


Figure: 2
Waterproofing system with polymer modified bitumen sheet.

Mynd 53 – Sænskar útfærslur

Dönsk lausn:

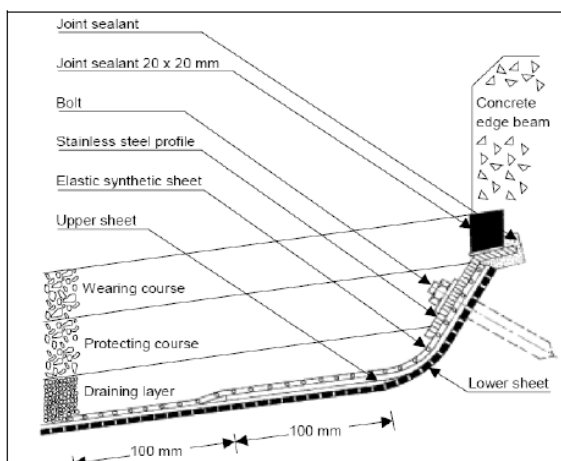


Figure 1: The edge beam where the sheets are fastened with a stainless steel profile to the concrete

Mynd 54 – Dönsk útfærsla

Tyrknesk lausn:

The typical pavement structure on concrete bridge decks:

AC-50 mm or SMA-40 mm
Bituminous /PMB sheet membrane
Special bitumen based primer
Concrete surface

The thickness and the bituminous mixture types of surface layer on concrete bridge is the same as that used on the adjacent road.

Mynd 55 – Tyrknesk lausn



6 Niðurstaða

Niðurstaða umfjöllunar um yfirborð brúa er afgerandi hvort sem horft er til tæknilegra eiginleika eða kostnaðar:

- Í upphafi var lagt upp með að skoða hvort mögulegt væri að endurbæta „hefðbundna aðferðina“, en það kom fljótt í ljós að þar væru ekki margir kostir, þannig að það var ekki skoðað frekar
- Það hefur þegar verið gert við yfirborð a.m.k. sex brúa, sem byggðar hafa verið eftir aðferð, sem hér er kölluð „hefðbundna aðferðin“ og við þrjár þeirra með mjög miklum tilkostnaði. Það liggur jafnframt fyrir, að komið er að viðgerð fleiri brúa, þannig að umfang þessa þáttar fer vaxandi á næstu árum
- Sérstakt slitlag tryggir sléttara yfirborð og betri aksturseiginleika og þar með meira öryggi vegfarenda, sem er mikilvægt vegna þess m.a. að varmarýmd brúarþversniðs er almennt mun minna en vegkroppisins og því myndast t.d. fyrr hálsa á brú en vegi, sem margir kannast við. Fjöldi útlendra ferðamanna, sem ekur um landið fer einnig vaxandi, þannig að þeim fer fjölgandi sem gefa sér að akstureiginleikar á brúm séu þeir sömu og í vegi
- Það er ekki nóg með að aksturseiginleikar á brú þurfi að vera þeir sömu og í veginum, það sama á einnig við um mörk vegar og brúa. Norðmenn setja mörkin við hámarkslengd brúa án þensluraufa við 100 – 120 m til þess að koma í veg fyrir dældir við brúaendana af völdum samdráttar brúa, þ.e. skriðs, rýrnunar og hitabreytinga
- Með sérstöku slitlagi er komið fyrir varnarlagi í yfirborði brúar, sem verndar burðarvirkið, sérstaklega kapla og bendingu. Slitlagið verður þannig hluti af því, sem kallað er marglaga þétting og er einn þátta sem verndar undirliggjandi mannvirki og ætti að lengja líftíma brúa
- Kostnaður á líftíma mannvirkis verður mun lægri, ef sérstöku slitlagi er komið fyrir. Í reynd er verið að ýta kostnaði yfir á framtíðina með því að nota það sem hér hefur verið kallað „hefðbundna aðferðin“ og var í upphafi steyptra brúabygginga hérlendis eina mögulega lausnin, en þannig hefur það ekki verið um skeið
- Í ljósi þess, sem hér kemur fram er eindregið lagt til að vikið verði af braut „hefðbundinna brúa“ og jafnframt íhugað hvort unnt sé að breyta þeim brúm, sem þegar eru í farvegi, en skv. útreikningum í gr. 4.4 er það ekki íþyngjandi

7 Þakkir

Við höfum ítrekað leitað ráða hjá vinnufélögum okkar, sem hafa verið ólatir við að svara spurningum okkar og kunnum við þeim Kristjáni Kristjánssyni, fyrrverandi forstöðumanni Hönnunardeildar, Ingunni Loftsdóttir, verkefnastjóra vinnuflokka, Sigurði Halli Sigurðssyni, brúarsmið og Birki Hrafni Jóakimssyni, byggingaverkfræðingi bestu þakkir fyrir hjálpina.



Tilvísanir:

1. [Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual](#), Levels of Protection for Corrosion Protection; Federal Highway Administration, 2013
2. [Fib Bulletin 33](#), Durability of post-tensioning tendons, Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2006
3. [Ídráttarrör úr plasti, verksmiðjuframleiddur grautur](#), Rannsóknarverkefni 2016, sem Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar styrkti 2015
4. [Eftirspennt brúargólf, Klóríðinnihald í nokkrum steyptum brúargólfum](#), Hönnun 2006, Gísli Guðmundsson í samvinnu við Vegagerðina
5. [MC 2010, fib Model Code for concrete structures 2010](#), International Federation for Structural Concrete (fib) 2013
6. [Håndbok R762, Proseskode 2](#), Standard beskrivelsetexter for bruer og kaier. Hovedprosess 8, November 2015
7. [ÍST EN 1992-2](#); Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 2: Concrete Bridges
8. [Designers' Guide to EN 1992-2](#); Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 2: Concrete Bridges. C. R. Hendy and D.A: Smith. thomas telford 2007
9. [ICE/0706/012](#), The development of a revised unified approach for the design of reinforcement to control cracking in concrete resulting from restrained contraction, Final report
10. [Håndbok 185](#), Bruprojekttering Eurocodeutgave, Norska Vegagerðin frá 2011
11. [Techniques For Manually Estimating Road User Costs Associated With Construction Projects](#), December 1999. Texas Transportation Institute
12. [Asphalt pavement on bridge decks](#), EAPA; European Asphalt Pavement Association Belgiu, June 2013
13. [State of Florida, Department of Transportation](#), Gouting of Bridge Post-tensioning Tendons, 2002
14. [ÍST EN 12697 -16](#), Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 16: Abrasion by studded tyres, CEN European Cmmittee for Standardisation, 2016
15. [Efnisrannsóknir og efniskröfur](#), Leiðbeiningar við hönnun framleiðslu og framkvæmd, Á vef Vegagerðarinnar
16. [Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual](#), Levels of Protection for Corrosion Protection; Federal Highway Administration, 2013