

## Ídráttarrör úr riffluðu plasti fyrir spennikapla Rannsóknarverkefni



Gylfi Sigurðsson



2015.01.28

## Efnisyfirlit

1.	Inngangur .....	1
2.	Úr fib (fédération internationale du béton) ritum .....	3
2.1	Úr grundvallarritinu fyrir ídráttarrör úr plasti, fib bulletin no. 7 .....	3
2.2	Úr fib bulletin 33:.....	4
3.	Rannsóknir og reynsla annarra þjóða.....	5
3.1	Breskar rannsóknir og reynsla .....	5
3.1.1	Úrdráttur úr grein í Forsenic Engineering, Volume 166, 2013 .....	5
3.1.2	Technical Report No. 72, 2010 .....	8
3.1.3	Tilvitnanir úr Prestressed Concrete Bridges .....	10
3.2	Bandarískar rannsóknir og reynsla .....	10
3.2.1	Rannsóknir í The University og Texas .....	10
3.2.2	Úr Post Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual 2013 .....	14
3.3	Úr upplýsingabæklingi VSL .....	15
4.	Dæmi um samanburð á virkni stál- og plastídráttarröra .....	17
5.	Kostnaðarsamanburður.....	18
6.	Til íhugunar og nánari skoðunar .....	19
7.	Lokaorð.....	19
	Tilvísanir: .....	20



## 1. Inngangur

Það á við jafnt hér heima og erlendis að hefðbundin ídráttarrör fyrir grautaða, eftirspennta kapla hafa verið riffluð stálrör gerð úr stálrenningum. Um þessa gerð ídráttarröra gilda sérstakir staðlar, þ.e. [ÍST EN 523<sup>\(1\)</sup>](#), *Steel strip sheaths for prestressing tendons - Terminology, requirements, quality control* og [ÍST EN 524<sup>\(2\)</sup>](#), *Steel strip sheaths for prestressing tendons - Test methods - Part 6: Determination of leaktightness (Determination of water loss)*.

Skv. [Technical report, Bulletin 7<sup>\(3\)</sup>](#), *Corrugated plastic ducts for internal bonded post tensioning, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne 2000*, hafa ídráttarrör úr plasti verið notuð í mörg ár þar sem uppspennutækni er beitt svo sem þar sem um einn kapal er að ræða (e: monostrand), í bergakkerum, hengiköplum (e: stay cable) og utan á liggjandi köplum og þá einkum í sléttum rörum.

Í [Technical report, Bulletin 7](#) segir einnig að riffluð plaströr hafi verið notuð í grautaða hluta bergakkeru og að á árunum 1968 – 1974 hafi um 300.000 m af svörtum, riffluðum plaströrum úr polyethylen verið notuð sem ídráttarrör fyrir grautaða eftirspennta kapla í mislægum gatnamótum í Sviss. Eftir 30 ára notkun hefur ekki orðið vart við neina tæringu kapla í mannvirkjum með ídráttarrörum úr plasti, sem þurft hefur að rífa eða breyta.

Skv. [Technical report, Bulletin 7](#), höfðu þykkveggja plaströr nýlega, þ.e. á árunum fyrir 2000, orðið algeng fyrir ídrátt sveigðra / bogformaðra eftirspenntra kapla. Ástæða innleiðingu þeirra er þar talin vera sá eftirsóknarverði kostur að tæringarvörnin verði betri, minni töp við uppspennu, aukin mótstaða gegn staðbundinni tæringu kaplanna (e: fretting, fatigue resistance) og möguleiki þeirra til þess að verja / vakta strengina í rafrænu tilliti (e: feasibility for electrical monitoring). Fram kemur að t.d. í Sviss og Þýskalandi þurfi ídráttarrör þessarar gerðar að fara í gegnum sérstakt samþykkisferli (e: State Approval Process).

Brýr hér á landi eru gjarnan í tærandi umhverfi, salt loft berst að brúnum eftir því hvernig vindar blása, vegir í og næst þéttbýli eru saltaðir og í sumum tilvikum eru brýr við sjó eða yfir firði. Ástand á eftirspenntum köplum í ídráttarrörum úr stáli í brúm hér á landi hefur ekki verið kannað að svo komnu máli og engin dæmi eru um sýnilegar skemmdir.

Skv. [Technical report, Bulletin 7](#) virðist sem kaplar séu vel varðir gegn tæringu í ídráttarrörum úr plasti, þau geti því hugsanlega verið betri kostur en ídráttarrör úr stáli í tærandi eða sérlega tærandi umhverfi hér á landi og því er áhugavert að vita hver þróunin hefur verið síðustu ár.

Í ársbyrjun 2014 var því sótt var um styrk til Rannsóknarsjóðs Vegagerðarinnar vegna verkefnisins; **Ídráttarrör úr riffluðu plasti fyrir spennikapla**, sem þannig var lýst í stuttri lýsingu með umsókninni:

*Hér á landi hefur verið hefðbundið, að ídráttarrör fyrir kapla séu úr blikki. Skv. Bulletin nr. 7; Corrugated plastic ducts for internal bonded post tensioning, 2000, hafa ídráttarrör úr*



*plasti verið notuð í umtalsverðum mæli bæði í festur og eftirspenntar brýr. Markmiðið með að innleiða þau var að auka tæringarvörnina, þar sem þau eru ekki samsett og geta þess vegna náð milli uppspennipunktanna. Áhugavert er að kanna hver þróunin hefur verið, hvort hlutdeild ídráttarröra þessarar gerðar hefur aukist og hvort fram hafi komið gallar og þá einnig hvort Vegagerðin eigi að skoða notkun ídráttarröra þessarar gerðar í stað ídráttarröra úr blikki.*

Nokkrir þættir eru nátengdir ídráttarrörum og er komið inn á þá þætti (t.d. grautinn) hér á eftir eftir því sem heimildir gáfu tilefni til.

Nálgun verkefnisins:

- Leita eftir rannsóknarniðurstöðum á netinu og eftir fræðiritum, ef það er mögulegt
- Leitað eftir reynslu annarra þjóða á netinu
- Ábendingar / tillögur til endurbóta

## 2. Úr fib (fédération internationale du béton) ritum

fib

### 2.1 Úr grundvallarritinu fyrir ídráttarrör úr plasti, fib bulletin no. 7

Grundvallar kröfur til rifflaðra ídráttarröra úr plasti eru skilgreindar í bulletin 7<sup>(3)</sup>, prófunaraðferðir o.s.frv., sem *International Federation for Structural Concrete (fib)* gaf fyrst út árið 2000 í Lausanne. Hér á eftir er örfáum atriðum gerð nokkur skil.

#### Efni og eiginleikar skv. gr. 2.3.2:

Það efni sem oftast er notað er polyethylene (HDPE) með háan eðlisþunga (e: high density polyetylen). Við vissar aðstæður getur polypropylene (PP) komið í stað HDPE.

Rifflur ídráttarröra geta verið vafnings- eða hringlaga. Þær geta verið samfelldar eða í bútum. Rifflurnar sjálfar geta verið sínuslaga eða strendar. Lýsandi mynd úr ritinu:

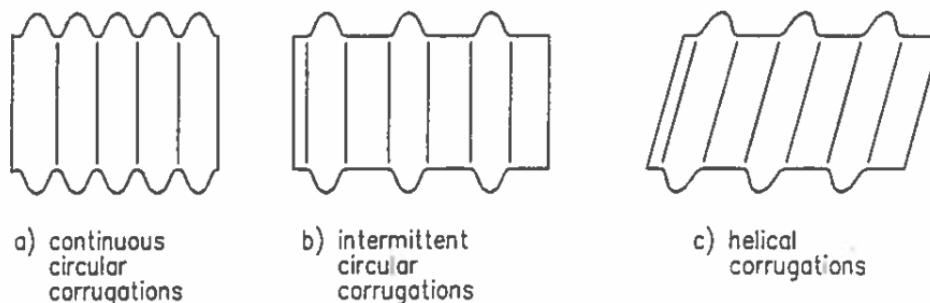


Fig. 1 : Shapes of corrugation

#### Skv. gr. 2.3.2 og 2.4.3 ná kröfur til plastídráttarröra til:

- vatnspéttleika
- þols gegn loftlagstengdum þáttum
- þols gegn oxun / ryði (e: oxidation) og efnaáreiti
- þols gegn aflfræðilegri áraun, sérstaklega;
  - við ídrátt og uppspennu
  - vegna grautarþrýstings
  - á þverspentum köflum, þ.e. þar sem krappar eru í lögninni
- heftieiginleika við aðliggjandi steypu / graut
- rafrænnar varnar

#### Þéttleiki gegn lekt skv. gr. 4.1.6:

Ídráttarkerfið ásamt samtengingum og ventlatengjum á að vera nægjanlega þétt, þegar það er sveigt í lágmarksboga skilgreindum í gögnum fyrir ídráttarkerfið.

#### Núningsþol skv. gr. 4.1.7:

Ídráttarrörin eiga að hafa nægjanlegt þol gegn áraun af völdum spennistálsins þegar það er spennt upp og áður en grautað er, þegar þau eru sveigð í lágmarksboga skilgreindum fyrir ídráttarkerfið.



Ídráttarrörin standast próf, sem skilgreint er í ritinu, ef veggþykkt verður ekki minni en 1,0 mm að prófinu loknu.

#### Ending / tæringarvörn skv. gr. 4.1.10:

Sýnt hefur verið fram á, að riffluð ídráttarrör úr stáli springa / rifna við endurtekna opnun (e: cyclical opening) steypusprungu þvert á rörið. Á hinn bóginn hefur verið sýnt fram á, að ídráttarrör úr plasti þola slíkar aðstæður betur.

## 2.2 Úr fib bulletin 33:

Skv. [Technical report, fib Bulletin 33](#)<sup>(4)</sup>, Durability of post-tensioning tendons, hafa riffluð plaströr sem eru hönnuð og prófuð skv. fib report no. 7<sup>(7)</sup> komið vel út í reynd. Ný kynslóð slíkra ídráttarröra hefur verið notuð með góðum árangri síðan upp úr 1990 og nokkrum milljónum metra hefur verið komið fyrir í mannvirkjum. Staðfest hefur verið með tilraunum að ídráttarrör þessarar gerðar mynda endingargóða og algjörlega þetta umgjörð um spennistálið jafnvel yfir tiltölulega víðar og virkar sprungur.



### 3. Rannsóknir og reynsla annarra þjóða

#### 3.1 Breskar rannsóknir og reynsla

##### 3.1.1 Úrdráttur úr grein í Forsenic Engineering, Volume 166, 2013

Byggt á gr. í [Forsenic Engineering Volume 166](#)<sup>(5)</sup>, Post-tensioned structures – improved standards eftir Gordon Marshall Clark.

Ýmislegt varð til að farið var að huga sérstaklega að öryggi eftirspenntra mannvirkja um og upp úr 1975. Dæmi voru um að eftirspennnar brýr / mannvirki hefðu hrunið. Þannig hrundi Ynys-y-Gwas Bridge in Wales skyndilega 1985 og brú yfir Mandovi River í Goa á Indlandi 1986 eftir innan við 20 ára notkun. Sú fyrrnefnda vegna þess að kaplar voru illa varðir á milli áfanga eða eininga, en í þeirri síðarnefndu voru sprungur, sem ekki var brugðist við í 6 ár. Meginburður Malle brúarinnar yfir Schelde, sem hrundi 1992, byggði á spenntum niðurgröfnum köplum, sem voru óaðgengilegir og tærðust. Í Berlín hrundi þak the West Berlin Congress Hall 1980. Þakið var þunnt, eftirspennt, skeljabak þar sem stangir (e: bars) voru í ídráttarrörum og tærðust að hluta þar sem grautargæðin voru léleg.

Vitnað er í skýrslu eftir Clark frá 1992 yfir galla í eftirspenntum mannvirkjum, þar sem komist er að þeirri niðurstöðu að þau hafi almennt komið vel út.

1977 bannaði Breska Samgönguráðuneytið notkun utan á liggjandi eftirspennukapla í brúm þar sem gallar / skemmdir höfðu sést í eldri brúm og þrátt fyrir að auðvelt væri að fylgjast með þróun slíkra skemmda.

Í ársskýrslum sem UK Standing Committee on Structural Safety gaf út á árunum 1979 – 1992 voru settar fram grunsemdir um galla í tengslum við grautun eftirspenntra kapla. Efasemdir sneru að hæfi grautunarefnanna, aðferðarfræðinni sem og útfærslum. Þetta varð til þess að Breska samgönguráðuneytið bannaði 1992 grautuð ídráttarrör fyrir eftirspenntra kapla. Bannið markaði byrjun á 20 ára rannsóknum og endurskoðun á stöðlum og aðferðafræði til þess að tryggja öryggi og áreiðanleika eftirspenntra mannvirkja.

The Highways Agency hóf skipulegar athuganir á brúm sem studdu grunsemdir um að það væru vaxandi vandamál í tengslum við sumar eftirspennnar brýr. Meðal galla sem komu í ljós voru tærðar festur og sundurtærðir vírar. Í útgáfu Concrete Society á bráðabrigða skýrslu 1995 voru sett fram drög af tillögum til úrbóta og í kjölfarið eða 1996 gaf Concrete Society út skýrslu, Technical Report no. 47<sup>(6)</sup>, sem varð til þess að áðurnefndu banni var aflétt.

Dæmi um skemmdir skv. myndum sem fylgja greininni í Forsenic Engineering, myndir sem þar eru merktar nr. 5 og 6:





Figure 5. Corroded top slab anchors – some barrel grips completely corroded away

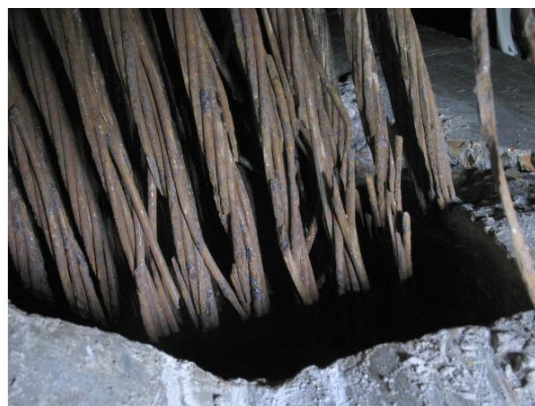


Figure 6. Significant wire and strand failures (encasement concrete removed)

## Helstu niðurstöður greinarinnar:

### Grautur:

Grautur gegnir í mörgum eftirspenntum mannvirkjum m.a. því hlutverki að verja spennistálið gegn tæringu. Skv. heimildinni hefur sá þáttur reynst vera grundvallar veikleiki og á síðustu árum hefur athygli og kröftum verið beint að því að skoða hvernig megi bæta hann. Prófunaraðferðir, sem notaðar hafa verið til þess að meta grautargæði í gegnum árin, hafa þannig reynst ófullnægjandi, en afleiðing ófullnægjandi grautargæða var sú að hann fyllti ekki nægjanlega upp í ídráttarrörin eða gæði hans voru ekki fullnægjandi til þess að verja spennistálið gegn saltáhrifum sem hugsanlega næði til þess. Með rannsóknum hefur skilningur fengist á hverjir lykileiginleikar grautsins þurfi að vera til þess að ídráttarrörin verði full og grauturinn geti varið stálið til lengri tíma, þar sem megin áherslan er á vatnsaðskilnað (e: bleeding). Notkun verksmiðju framleidds grauts er næstum orðin viðtekin venja í Bretlandi og unnið er að vottunarferli.

### Ídráttarrör:

Ídráttarrör úr stáli veita ekki langtímavörn í ágengu umhverfi sérstaklega þar sem steypdir hlutar / einingar eru tengdir saman, og því var snemma talið að umbætur gætu beinst að rörunum. Það var á hinn bóginn ekki auðvelt að leggja til alveg nýja framleiðslu á markaði sem í meginatriðum er opinber ekki síst þar sem á markaðnum voru ekki til neinar markmiðsmiðaðar vörur á þessum tíma. Ný gerð ídráttarröra þurfti að vera sterk, ryðfrí, vatnspétt, unnt að laga þau að þeim ferli í rými, sem óskað var eftir, þola álagið frá steypuvinnunni, ídrætti og uppspennu kaplanna og unnt að fylla þau með graut. Síðast en ekki síst þurfa rörin að geta flutt krafta um hefti til steypunnar. Sjá myndir af ídráttarrörum úr plasti úr greininni í Forsenic Engineering, myndir sem þar eru merktar nr. 7 og 8.

Það kom síðan í hlut fib (fédération internationale du béton) að stýra innleiðingu á kröfum fyrir nýja gerð ryðfrírra röra úr plasti og sem birt var í áður nefndum bulletin no. 7.<sup>(3)</sup> Fib vinnur nú að uppfærslu leiðbeininganna, sem síðar munu verða settar fram í stöðlum.

### Gæði og þekking:

Á Bretlandi var sett fram tillaga að vottunarkerfi sem voru bein viðbrögð við kröfum sem mælt var með að teknar yrðu upp og snúa að þjálfun, þekkingu, reynslu og framkvæmd hjá fyrirtækjum sem annast eftirspennu sem og að hafa skjalfest gæðakerfi í tenglum við vinnu við eftirspennu.





Figure 7. Typical corrugated plastic duct and coupler



Figure 8. Corrugated plastic duct and coupler with vent

### Útfærslur:

Til viðbótar endurbótum á efnunum var talið mikilvægt að læra af útfærslum sem hefðu mistekist eða valdið vandamálum og leggja til leiðbeiningar fyrir burðarþolshönnuði. Reynsla af tæringu kapla í eða við festur gaf til kynna þörf á aukinni vörn við festur staðsettar á útsettum stöðum svo sem undir þensluraufum eða á steypuskilum. Þetta varð til þess að hugmyndafræðin um fleiri en eitt varnarlag (marglagavörn) varð til (e: multi-layer protection), sem fól í sér að koma fyrir öðru eða þriðja varnarlaginu við kaplana í stað þess að treysta aðeins á eitt varnarlag. Mælt var með að forðast festur í vösum í efri plötum brúa / efri brún brúa, þar sem lekahætta að festunum virtist vera mikil þar. Því til viðbótar var lagt til að notuð væri tvöföld rakavörn á ákveðnum stöðum og leiðbeiningar voru settar fram um staðsetningu og þéttingu ventla ídráttarröra, sem tilraunir höfðu leitt í ljós að stuðlaði að heppnaðri grautun á viðkvæmum háum stöðum í feril ídráttarröranna.

### Eftirlit:

Eigendur eftirspennta mannvirkja, sérstaklega brúa, hafa verið vaktir til vitundar og viðeigandi stjórnvöld hafa mörg hver innleitt sérstakar eftirlitsaðgerðir og áhættumat vegna mannvirkja þessarar gerðar. Innri (bora göt) (e. intrusive) rannsóknir eru almennt viðurkenndar sem einu áreiðanlegu aðgerðirnar til þess að skoða ástand innri (e: internal) eftirspennta kapla. Dæmi um mannvirki, sem hafa vakið menn til umhugsunar eru mislæg gatnamót við Hammersmith í London byggð 1962, sem eru úr forsteyptum einingum. Staðsteyptar tengingar milli eininga eru taldar áhættusamar. Tæring af völdum salts fannst þar í eftirspenntum köplum í efri brún plötu.

Í flestum tilvikum mun ekki vera sýnilegt á eftirspenntum mannvirkjum, að þau séu u.þ.b. að fara að gefa sig. Af þeirri ástæðu er brýnt að framkvæma ítarlegt eftirlit / rannsóknir, þar sem um mikilvæg deili er að ræða, sem miklu skiptir að séu í lagi.

### Staðlar:

Útgáfa traustra nýrra ráðlegginga í formi tækniskýrslu, [Technical Report No. 47<sup>\(6\)</sup>](#), Durable post-tensioned concrete bridges, (Concrete Society, 1996) varð til þess að Highways Agency, aflétti banni á gerð brúa með grautuðum eftirspenntum köplum. Samsíða því voru gefnir út nýir staðlar um grautun, grunnkröfur, prófunaraðferðir og aðferðir við grautun.



### 3.1.2 Technical Report No. 72, 2010

[Technical Report No. 72<sup>\(7\)</sup>](#), Durable Post-tensioned Concrete Structures, er endurskoðuð útgáfa annarar útgáfu Technical Report No. 47, þar sem ráðleggingar fyrri útgáfu eru endurskoðaðar og útvíkkaðar. Ástæða er til þess að koma inn á nokkur atriði.

#### Úr gr. 1.2.1; Eftirspenntar brý:

Í greininni eru tilgreind sömu dæmi um skemmdir eða hrún sem getið er um hér að framan, en nokkur atriði eru upplýsandi.

Skv. athugun the British Cement Association var tilfinningin sú að fá dæmi væru um alvarlega tæringu og að eftirspennt mannvirki hefðu almennt komið vel út í notkun. Minnt er á að það sé mjög erfitt að skoða ástand kapla og í sumum tilvikum nær útilokað, þannig að taka beri fyrri staðhæfingum svo sem frá Bandaríkjunum um, „að sýnilegur vitnisburður um tæringu sé í minna en 0,1% brúa“ með varúð. Mikilvægt sé að gera sér grein fyrir því, að eina örugga leiðin til þess að finna göt í graut innri ídráttarröra (e: internal tendons) sé að bora göt inn í ídráttarrörin.

Skv. rannsókn Transport Research Laboratory á yfir 200 eftirspenntum mannvirkjum kom í ljós:

- tíðni mikillar tæringar var lítil eða ~ 2%
- ~ 92% brúa voru flokkaðar sem góðar eða um minniháttar vandmál væri að ræða
- fylgjast þyrfti með 4,3% þeirra og 3,5 % væru verulega skemmdar

Upplýsingar um tilvist gata í grautuðum ídráttarrörum lá fyrir, flest mjög lítil og höfðu ekki leitt til verulegrar eftirgjafar burðarvirkisins. Engin brúanna var talin ótrygg, en nokkrar voru með verulega galla.

#### Úr gr. 1.4.3; Grautunarefni:

Fyrir 1992 var það venjan í Bretlandi og annars staðar að nota sement ætlað til almennra nota í graut og bætt saman við það íblöndunarefnum og vatni á verkstað og lýst sem „venjulegum graut“. Eiginleikar sements ætlaðs til almennra nota eru á hinn bóginn breytilegir, sérstaklega frá mismunandi framleiðendum, sem veldur breytileika í eiginleikum grautsins. Í ljós kom að erfitt var að viðhalda stöðugleika og áreiðanleika „venjulegs grautar“ í öllum aðstæðum svo sem mismunandi hitastigi. Kröfur sem „sérstakur verksmiðjuframleiddur grautur“ ætti að uppfylla voru því settar fram og rannsóknum ýtt úr vör. Í dag er tilbúinn grautur verslunarvara.

Fram kemur að Vinnuhópurinn (vinnuhópur Concrete Society) sé þeirrar skoðunar að íhuga ætti notkun „sérstaks grauts“ í upphafi vegna stöðugri og betri eiginleika. Skv. endurgjöf frá vettvangi kemur fram að heppnast geti að nota graut, sem framleiddur er á staðnum úr efnum, sem eru búin til undir sérstöku framleiðslueftirliti. Það á einkum við um stór verkefni, þar sem tilraunir eru réttlætanager og mögulegt er að tryggja gæði og einsleitni sements og íblöndunarefna í verkinu sem heild.

Í vottunarkerfi CARES fyrir eftirspennt virki er krafa gerð um verksmiðjuframleiddan graut, sem aðeins þarf að bæta vatni saman við þurrefnin á staðnum og hræra.



### Úr gr. 3.1; Hönnunarkænska, marglaga vörn:

Hugmyndafræðin um marglaga vörn hefur verið innleidd og í því sambandi er nefnt að skoða þurfi eftirfarandi:

- staðsetning brúarinnar m.t.t. áreitis almennt
- að brúin sé samfelld, þ.e. að henni sé sem minnst skipt með þensluraufum
- að hugsað sé fyrir aðgengi til eftirlits, prófana, viðhalds og endurnýjunar búnaðar með skemmri líftíma en brúin í heild
- þversniðið, lögunina, sérstaklega útlínur
- byggingaraðferðin og í því sambandi að framkvæmdin sé gerleg frá faglegu sjónarmiði
- vatnsvörn yfirborðsins
- að fráveitukerfið virki vel og komið sé í veg fyrir að vatn smjúgi inn

Í framhaldinu er getið um þá þætti, sem snúa að köplunum sjálfum:

- fylla ídráttarrörin með graut
- ídráttarrörin séu ryðfrí
- ídráttarrörin hönnuð til þess að koma í veg fyrir að utanaðkomandi efni komist inn í þau
- staðsetning, útfærsla og vörn festa

### Úr gr. 3.4.2; Ídráttarrör

Þar segir m.a. að á seinni árum (væntanlega upp úr 1996) hafi menn farið að nota ídráttarrör, sem ekki eru úr málm. Þau eru gerð úr polyehylen með háan eðlisþunga (HDPE), þekkt sem PE80 eða polypropylene og hafa marga kosti:

- tæringarþolin
- þetta betur gegn aðkomuefnum
- þau má þrýstiprófa til þess að sýna fram á þéttleika
- hæfari til að „sjá í gegnum“ með sumum tegundum prófunarbúnaðar

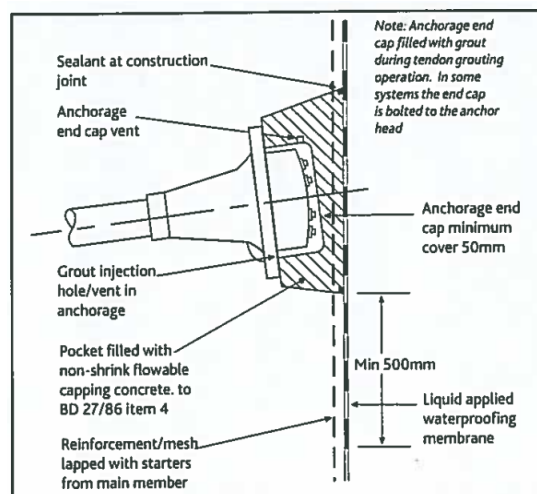
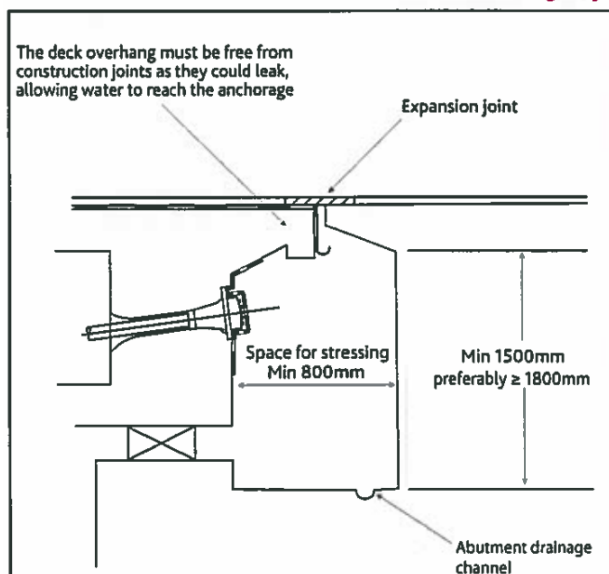
Í endurskoðaðri verklýsingu Highways Agency fyrir brýr er krafa gerð um tæringarþolin ídráttarrör. Þrýstiprófa skal rörin áður en steipt er til þess að ganga úr skugga um að samsetningar séu í lagi. Í viðauka A í Technical Report No. 72<sup>(7)</sup> kemur fram að prófa eigi rörin með 0,1 bara (10 kPA) loftþrýstingi til þess að sýna fram á að kerfið sé óskemmt og hafi verið rétt sett saman. Kerfið er í lagi, ef þrýstingsmínkkunin er minni 10% að 10 mínútum liðnum.

Skv. rannsóknum vinnuhóps Concrete Society eru ákveðin vandamál í tengslum við þéttingu við samsetningar röranna, við festur og við ventla. Vonir eru bundnar við að alveg þétt ídráttarkerfi verði þróað með tímanum.

### Úr gr. 3.4.3; Staðsetning festa:

Skv. endurgjöf frá eftirliti / rannsóknum kemur fram, að aðstreymi tærandi efna sé algengast við festur og tæring sé komin af stað í köplum strax fyrir innan festurnar (oft í tengslum við ófullnægjandi grautun). Að þessu eru sú ályktun dregin, að mikilvægt sé að huga að staðsetningu festa sem og deililausn þeirra með það að markmiði að hindra að vatn komist að ídráttarrörunum. Tvö dæmi um deili úr skýrslunni:

**Figure 3**  
**Exposed external anchorage at end of deck with an abutment gallery.**



**Figure 9**  
**Buried anchorage for stressed or dead end.**

### 3.1.3 Tilvitnanir úr Prestressed Concrete Bridges

*Prestressed Concrete Bridges, Design<sup>(8)</sup> and construction, Second edition 2012* er hagnýt handbók ætluð hönnuðum þar sem m.a. er fjallað um eftirspennt mannvirki. Í bókinni er að finna fjölmargar ábendingar og leiðbeiningar sem tengd eru eftirspenntum mannvirkjum, sem ekki verða rakin hér að undanskildum tveimur tilvísunum sem eru svo að segja í framhaldi af því sem getið er um hér að framan.

#### Dæmi um tæringu í eftirspenntum virkjum:

Skv. heimildinni segir, að Bretland sé ekki eina landið þar sem vandmál hafi komið upp í tengslum við eftirspennt virki. Þannig hafi tæring verið greind í köplum 11 brúa í Bandaríkjunum á árunum kringum 2000. Kaplar allra brúanna voru mjög tærðir og þörf var á að skipta þeim út. Tvö dæmi eru skýrð nánar og snúa þau að utan á liggjandi köplum.

Ennfremur segir að frá Evrópu hafi borist upplýsingar um tærða kapla í Sviss, Frakklandi og Belgíu, en einnig frá Asíu og þá einkum frá Japan.

#### Ídráttarrör fyrir eftirspennta kapla í Bretlandi:

Afdráttarlaus niðurstaða á bls. 60 vekur athygli:

Mikil vinna hefur verið lögð í það að undanförunu að þróa ídráttarrör, sem eru lokuð og alveg vatnspétt. Þessi kerfi eru framleidd úr PVC fyrir ídrátt kapla sem eru inni í mannvirkinu (e: internal tendons) og HDPE fyrir utan á liggjandi kapla (e: external tendons). Þetta eru eina gerð ídráttarröra, sem leyfð eru í Bretlandi í dag. Annars staðar í heiminum er enn algengt að nota riffluð stálrör fyrir ídrátt kapla sem eru inni í mannvirkinu. Riffluð stálrör, sem framleidd eru úr stálrenningum og læst saman eru lausn sem reynist ekki vatnspétt.

## 3.2 Bandarískar rannsóknir og reynsla

### 3.2.1 Rannsóknir í The University og Texas

Byggt á [Project Summary Report O-1405-S<sup>\(9\)</sup>](#), Durability Design of Post-Tensioning Bridge Substructure Elements, yfir rannsóknir sem Center for Transportation Research, Bureau of



Engineering Research við The University of Texas at Austin vann. Veikir hlekkir eru til staðar í tengslum við grautaða eftirspennta kapla, sem geta falist í eftirfarandi:

- mikið / hátt gegndræpi (e: permeability) steypu
- sprungum í steypunni
- tengingar milli ídráttarröruna eru ekki nægilega lokaðar og þétt steypa (e: impermeable) ver þau ekki með fullnægjandi hætti
- göt eða eyður eru í Portland sement grautum í ídráttarrörunum, vatnsaðskilnaður og sprungur og /eða
- spennistálið er ekki nægjanlega varið og farið nægjanlega gætilega með það á framkvæmdastigi

Mynd í greininni, sem sýnir dæmi um það sem kann að gerast:



Eitt megin vandamálið í tengslum við uppspennta steypu með grautuðum köplum eru erfiðleikar við að koma við nægjanlega góðu vöktunar- og eftirlitskerfi. Ástandsskoðun er oft takmörkuð við sjónskoðun, þar sem horft er eftir sprungum, flögnun og ryðlit, en þá er hætt við að ekki verði vart hugsanlegra skemmda í spennistálinu, sem geta reynst orsök alvarlegs og skyndilegs hruns.

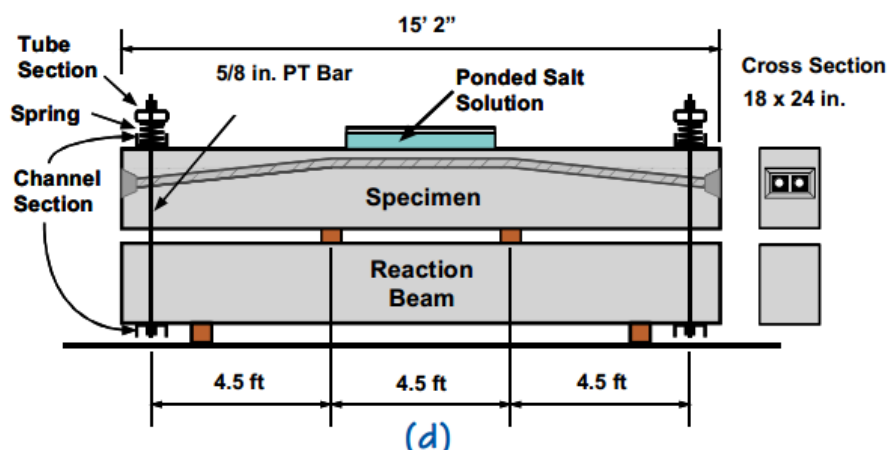
Rannsókninni var skipt upp í eftirfarandi þætti eftir umfangsmikla yfirferð fyrirbyggjandi gagna:

1. fara yfir skýrslur og rannsóknir um ástandsskoðanir undirbygginga brúa sem eru til staðar
2. rannsaka tæringarvarnir innri kapla (e: internal prestressing tendons) í forsteypnum brúm gerðum úr einingum
3. þróa endurbættan graut í ídráttarrör fyrir eftirspennta kapla
4. langtíma tæringarrannsókn í stórum skala á eftirspenntum bitum og súlum og
5. þróa ráðleggingar og hönnunarleiðbeiningar fyrir hönnun endingargóðra eftirspennta brúa þar sem grautað er í ídráttarrörin umhverfis kaplana

Alls voru notuð 38 stór sýni undir lið 2 til þess að rannsaka tæringarvörn innri kapla á mörkum eininga (e: segment joints).

Undir lið 3 var fjöldi grautartegunda prófaður í þrem áföngum til þess að þróa hágæða graut m.t.t. tæringarvarnar. Áfangarnir fólust í að prófa ferskan graut, prófun í hröðuðu (e: accelerated) tæringarprófi og prófunum á graut í ídráttarrörum í fullri stærð lögðum í parabóliska ferla, sem líkti eftir því sem er í reynd. Í framhaldinu var mælt sérstaklega með tveimur grautartegundum, sem síðan hafa verið mikið notaðar.

Undir lið 4 voru prófaðir 27 stór bitapör, efri og neðri biti. Efri bitarnir með köplum, en ekki þeir neðri, sjá hjálagða mynd úr skýrslunni:



16 bitapör voru notuð til þess að rannsaka áhrif uppspennustigsins, sprunguvídda og hággæða grauts, en 11 til þess að rannsaka samsetningar milli ídráttarröra, grautargerða, steypugerða, gerð kapals, gerð ídráttarröra og festuvarnir.

### Helstu niðurstöður:

#### Grauturinn:

- grautur með 30% flugösku og v/s – tölu 0,35 kom mjög vel út í lárétrtri notkun
- grautur með 2 % af efni sem vinnur á móti vatnsaðskilnaði og v/s – tölu 0,33 kom mjög vel út í lóðréttri notkun
- göt í grautuninni vegna innilokaðs lofts, vatnsaðskilnaðar eða vegna þess að ídráttarrörin fylltust með ófullnægjandi hætti eða flæði hans var of lítið, reyndust skaðleg ekki aðeins fyrir kaplana en einnig fyrir sínhúðuðu ídráttarrörin, sbr. mynd 2 ú greininni hér að framan
- grauturinn er ekki spenntur upp (honum er dælt í að lokinni uppspennu) og því eru oft sprungur í grautnum á notálagsstigi
- það virðist hafa nokkur langtímaáhrif að bæta Calcium Nitrit tæringarvara í grautinn

#### Ídráttarrörin:

- galvanhúðuð ídráttarrör úr stáli komu illa út, en plaströr mjög vel
- notkun skeyta, sem eru alveg fyllt með epoxy ásamt með ósamsettum ídráttarrörum úr plasti reyndist góð vörn

#### Sprungur og tengi:

- þéttari sprungur höfðu í för með sér mjög mikla staðbundna og jafndreifða tæringarvirkni
- þversprungur af völdum álags leiddu til afgerandi tæringarskemmda
- víðari sprungur í langstefnu bita og kleyfnisprungur (e: splitting cracks) gáfu til kynna mikla tæringu inni í bitanum
- þurrar samsetningar (e: dry joints) og epoxysamsetningar fylltar með ófullnægjandi hætti komu illa út





#### Uppspennustig:

- hærra uppspennustig leiddi til betri varnar gegn tæringu. Minni lekt af völdum aukins uppspennustigs leiddi til betri mótstöðu gegn hárpípuáhrifum

#### Steypugerð:

- hágæða steypa leiðir til minni inndreyplingar klórs

#### Steypuhulur:

- minni steypuhulur leiða ótvírætt til aukinna skemmda járnþendingarinnar

#### Samsetningar á sínxhúðuðum ídráttarrörum:

- hvorki hefðbundnar samsetningar röra í iðnaðinum, þ.e. nota límband (e: duct taped) né hitasamdráttar samsetningar (e: heat shrink) virtust hindra innstreymi raka eða klórs

#### Pakkingar í eftirspennurörum:

- notkun pakkinga í samsetningum til þess að komast hjá að fylla ídráttarrör með epoxy í einingamannvirkjum (e: segmental construction) eða notkun gúmmípakkinga til þess að þétta enda ídráttarröra í súlusamsetningum (e: column joint) varð til þess að sýnin komu illa út

#### Nokkrar helstu ráðleggingar rannsakendanna:

- nota ætti graut með  $v/s = 0,35$ , sementi blönduðu með 35% flugösku og 4 ml/kg superþjálnefnis í ídráttarrör sem rísa ekki hátt og þar sem áreiti er mikið
- ef ídráttarrörin rísa hátt og áreiti er mikið ætti  $v/s$  að vera 0,33 og nota jafnframt 2% blöndu sem vinnur á móti vatnsaðskilnaði
- nota ætti ídráttarrör úr plasti í öllum tilvikum jafnvel þó áreiti umhverfisins sé takmarkað
- ávallt ætti að nota epoxy samsetningar (e: epoxy joints) með köplum sem eru inni í virkinu (e: internal prestressing tendons)
- í mannvirkjum úr einingum ætti að vera strangt eftirlit og mikil byggingareynsla til staðar til þess að tryggja fullkomna grautun og góða epoxy fyllingu samsetninga milli eininga
- forðast ætti pakkingar í ídráttarrörum í epoxysamsetningum
- aðeins ætti að nota blandaða bendingu (slakbendingu og uppspennu) í virkjum í áreitnu umhverfi, ef farið er í sérstakar aðgerðir til þess að þétta sprungur gegn innstreymi klóríða
- burðarvirki / burðarvirkjahlutar í áreitnu umhverfi ættu að vera uppspenntir (e: fully prestressed)
- mælt er með notkun hágæða steypu með  $v/s = 0,29$  í ágengu umhverfi
- þróun betri samsetninga ídráttarröra er mikilvæg
- þáttur í skoðun brúa sem eru í notkun ætti að vera að greina hvort tæring sé hugsanlega í langsprungum eða kleyfnisprungum (e: splitting crack)
- stólar til þess að tryggja viðunandi hular eiga alfarið að vera úr plasti
- súlur / stöplar ættu að vera spenntar í mjög ágengu umhverfi til þess að verja slakbendingu og vafninga / lykkjubendingu
- sínxhúðuð eða epoxyhúðuð slakbending henta í ágengu umhverfi



### 3.2.2 Úr Post Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual 2013

U.S Department of Transportation, The Federal Highway Administration gefur út [Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual](#)<sup>(9)</sup>, 2013. Eftirfarandi efni tengt viðfangsefninu er fengið þaðan.

#### Úr grein 2.4.4; Verksmiðjuframleiddur grautur:

Eiginleikar grauts sem er unninn þannig, að grunnefnin eru mæld og síðan hræð á staðnum eru ekki alltaf einsleitir. Ástæða þess er breytileiki efnanna, dagamismunur á blöndunum, ekki ávallt sami vinnuhópurinn sem kemur að blönduninni, veðurskilyrði o.s.frv. Í þeim tilgangi að eyða vandamálinu hafa vegmálayfirvöld nokkurra fylkja innleitt strangari kröfur um gæðaeftirlit með því að gera kröfu um að grauturinn sé verksmiðjuframleiddur. Í verksmiðjuframleiddum graut hafa öll grunnefnin verið mæld og blandað saman við kjöraðstæður. Þetta tryggir að aðeins þarf að blanda / hræra vatni saman við þurrefnin á verkstað.

Vegamálayfirvöld fylkjanna gætu samþykkt grautarefnin fyrirfram eða önnur stofnun eða fyrirtæki annist þann þátt. Í því tilviki er viðeigandi að samþykkið byggji á skriflegu vottorði; að því gefnu að framleiðandinn sé með gæðaeftirlit sem má staðfesta með því að senda prófunarskýrslur til ráðgjafans / hönnuðarins. Vottunin ætti að sýna að grauturinn uppfylli kröfurnar. Á verkstað verður að vera gæðaeftirlit og fylgjast með grautarframleiðslunni með mismunandi prófunum til þess að ganga úr skugga um að hann uppfylli kröfur.

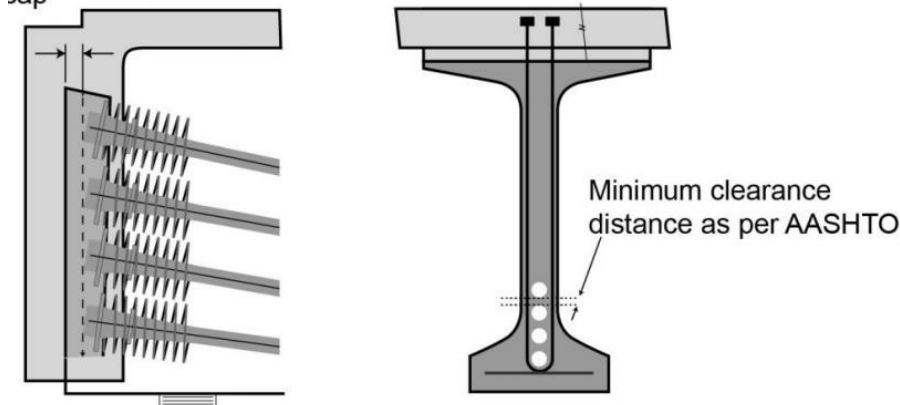
#### Úr grein 2.4.4; Ídráttarrör:

Upphaflega var ekki litið þannig á, að ídráttarrör gengdu því hlutverki að verja kapla gegn tæringu. Megin hlutverk þeirra væri að búa til gat eða leið í gegnum mannvirkið sem kaplarnir væru dregnir í. Í dag er litið á ídráttarrörin sem ein mögulegra varnarlína fyrir kaplana gegn tæringu. Mismunandi gerðir ídráttarröra þjóða upp á mismunandi góða tæringarvörn. Vafin, sínhúðuð stálrör veita lítið viðnám gegn inndreypingu klóríðjóna í gegnum steypu um vafningssamsetningarnar, grautinn og að köplunum. Í sumum eldri rannsóknum var litið á óþéttleika ídráttarröra þessarar gerðar sem kost, þar sem steypan utan þeirra mundi soga til sín umframvatnið úr grautum. Því til viðbótar þjónaði sínhúðin sem fórnarmálmur.

Ídráttarrör úr plast veita raunverulega vörn gegn inndreypingu tærandi þátta að því gefnu, að samsetningar röranna séu þéttar. Ídráttarrör fyrir innri kapla (e: internal tendons) geta núist / skorist og orðið fyrir staðbundnum skemmdum þar sem kaplar núast og nuddast við vegg þeirra þegar þeir eru dregnir í og spennir upp. Þetta ætti samt sem áður ekki að vera vandamál við venjulegar aðstæður þar sem krafa er gerð um lágmarksþykkt og að rörin séu prófuð fyrir núningspoli.

### Úr grein 5.5.3; Festuvörn, deili:

Áhersla er lögð á marglaga varnir bæði í bresku og bandarísku heimildunum. Það á við um festur og dæmi um það er að finna í grein 5.5.3:



Four levels of protection provided by

- Grout
- Plastic cap
- Pour-back material
- Encasement by diaphragm

### 3.3 Úr upplýsingabæklingi VSL

Á heimasíðu VSL (Post – Tensioning & Speciality Reinforcement Systems) er ýmsar upplýsingar að finna og úr bæklingi með yfirskriftina [VSL Post Tensioning Solutions](#)<sup>(1)</sup> má finna eftirfarandi:

Á bls. 9 er kynning á ídráttarrörum þeirra úr plasti:

Ná má sérstökum ávinningi með VSL PT-PLUS kerfinu.

Riffluð ídráttarrör úr stáli eru að öllu jöfnu notuð í umhverfi sem er ekki áreitið. Riffluð ídráttarrör úr plasti, með plast tengistykkjum, bjóða upp á eiginleika í samanburði við hefðbundin ídráttarrör úr stáli, sem felast í þéttri umgjörð umhverfis kaplana, háu þreytuþoli og lágu viðnámi.

Í grein 3.1 er fjallað nánar um ídráttarrör:

Sú gerð ídráttarröra sem er mest notuð er unnin úr vöfðum stálrenningum. Þau eru riffluð og vatnspétt og verða að vera nægjanlega sterk til þess að þola mismunandi mekanískt álag.

Til þess að bæta tæringarvörn og auka þreytuviðnám kaplanna er mælt með notkun VSL PT-PLUS riffluðu plaströrakerfi. Kerfið hentar sérstaklega í járnabrautarbrýr, brúayfirbyggingar, bílastæðabyggingar og við aðrar aðstæður, þar sem búast má við mikilli tæringarhættu eða þreytuálagi. Með sérstakri útfærslu við festur veita rörin einnig köplunum rafeinangrun (EIT) í varnarflokki PL3 (fib bullein 33<sup>(4)</sup>). Þessi EIT rafeinangrun gerir mögulegt að fylgst sé með þéttleika þess sem umlykur þá og kapalvörninni yfir allan hönnunarlíftíma mannvirkisins.



Eftirfarandi skýringarmynd fylgir textanum:

anchors allows to provide electrically isolated tendons (EIT) and a protection level of



¹ Couplers are available with/without grout vents for a threaded tube with dia. 23 mm

Mælt er með sérstakri hlíf undir rörin yfir stólum:



**PT-PLUS® plastic duct with protection shell**

**VSL Protection shells are recommended to be fixed on the duct at tendon supports for tendon radii  $R < 2 R_{min}$  (see under 4.2), and where ducts risk to be dented by closely placed rebars.**



## 4. Dæmi um samanburð á virkni stál- og plastídráttarröra

48 m löng brú, 10 m að breidd, hæð burðarvirkis 1,0 m, yfir tvö höf var reiknuð annars vegar með riffluðum ídráttarrörum úr stál og hins vegar plasti. Gengið var út frá gildum sem VSL mælir með:

Riffluð ídráttarrör úr stáli, 8 stk, lengd ~ 48 m:

Curvature Coefficient = 0,2,  $k=0,8 \times 10^{-3}$

Wobble Coefficient =  $0,2 \times 0,8 \times 10^{-3} = 1,6 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$

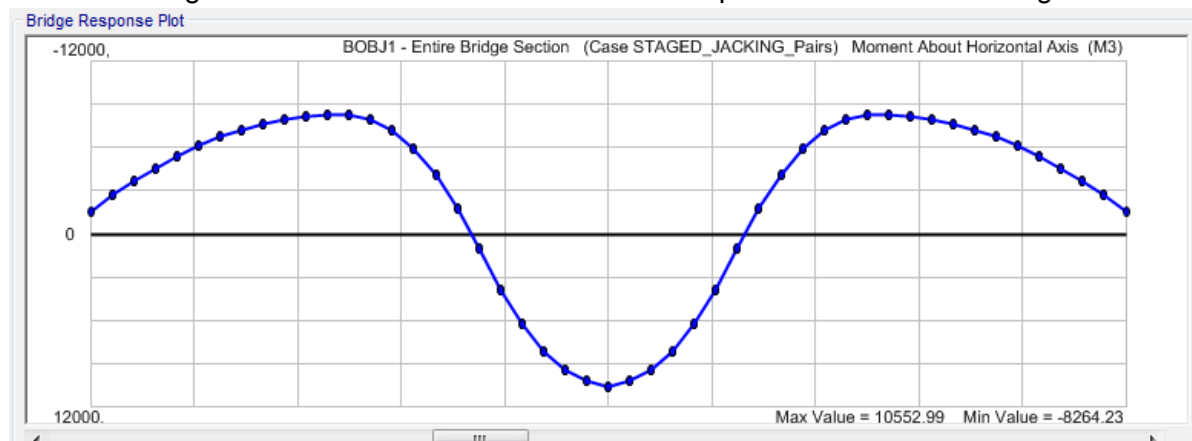
Riffluð ídráttarrör úr plasti, 8 stk, lengd ~48 m:

Curvature Coefficient = 0,14,  $k=1,0 \times 10^{-3}$

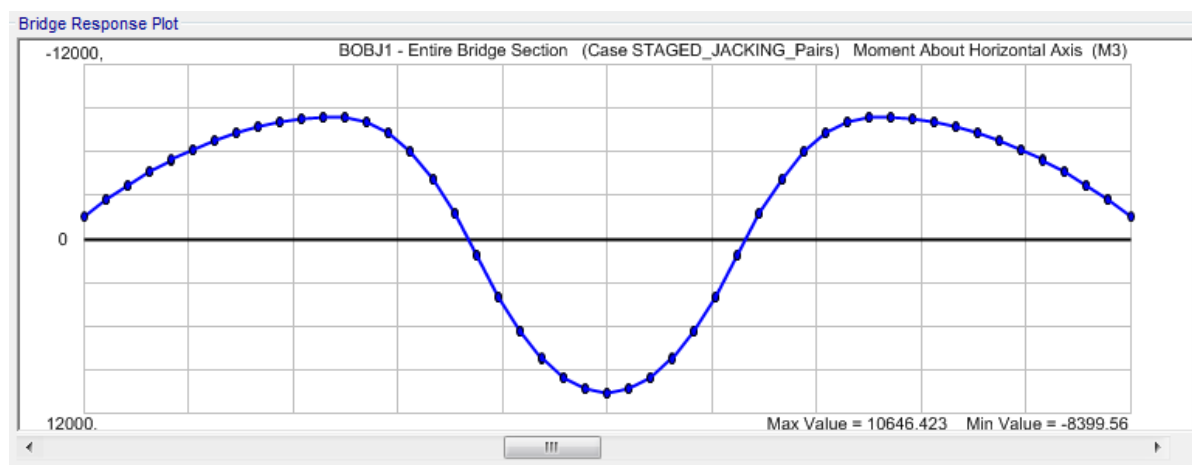
Wobble Coefficient =  $0,2 \times 1,0 \times 10^{-3} = 1,4 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$

Lásatapið var í báðum tilvikum sett 0,006 m.

Útreiknuð vægi í riffluðum ídráttarrörum úr stáli sem kaplarnir reiknað í CSi Bridge:



Útreiknuð vægi í riffluðum ídráttarrörum úr plast sem kaplarnir reiknað í CSi Bridge:



Hlutfallið milli vægja í hafi og yfir milliundirstöðu:

Hlutfall plast / stál í hafi =  $10.646 / 10.553 = 1,009$

Hlutfall plast / stál yfir milliundirstöðu =  $8.400 / 8.264 = 1,016$



## 5. Kostnaðarsamanburður

Skv. upplýsingum frá Spændbetong í Danmörku dagsettum 19.06.2014 er almennt verið ídráttarröra að tengingum milli ídráttarröra (á 6 m fresti) meðtöldum:

Ø75 mm: í málm 25 DKK / m og í HDPE: 40 DKK / m

Ø100 mm; í málm 35 DKK / m og í HDPE: 60 DKK / m

Ventlatengingar eru ekki innifaldar.

Ef viðbótarkostnaður vegna ídráttarröra úr plasti er yfirfærður á dæmið hér að framan fæst:  
Heildarlengd röra er  $\sim 8 * 48 = 384$  m.

Viðbótarkostnaðurinn að ventlum undanskildum er þá  $384 * 20 * 20,3 \sim 156.000$  kr. miðað við að gengi dönsku krónunnar sé um 20,3 kr.

Kaplar í ídráttarrörum úr plasti taka upp meira vægi í reiknaða dæminu, en munurinn er ekki nægjanlega mikill til þess að fækka megi köplum og reikna til sparnaðar.





## 6. Til íhugunar og nánari skoðunar

### Ídráttarrörin:

Hugmyndafræði marglagavarnar hefur verið innleidd bæði í Bretlandi og Bandaríkjunum. Vafin, riffluð ídráttarrör úr stáli voru hugsuð til þess að búa til leið í gegnum mannvirkið fyrir ídrátt kapla, en ekki vörn á sama tíma fyrir kaplana gegn aðkomuefnum. Skv. heimildunum sem vitnað er í hér að framan eru riffluð ídráttarrör úr plasti mun þéttari en ídráttarrör úr stáli og áfram er unnið að því að þróa þau og auka þéttleikann. Hér á landi berst salt með veðri og vindum frá sjó, en götur eru auk þess víða saltaðar. Ef horft er fram í tímann má frekar búast við aukinni söltun vega aukinna krafa um hálkuvarnir heldur en að úr dragi. Líklegra verður að telja að áreitið við brúayfirborð aukist fremur en að úr því dragi, þegar fram líða stundir.

Algengast er að ekki sé sérstakt þéttilag á yfirborði brúa. Fram kemur hér að framan að það er erfitt að skoða ástand kapla og það hefur að svo komnu máli ekki verið reynt hér á landi það er því ekki unnt að rökstyðja að staðan sé betri hér en annars staðar. Einnig má spyrja hvort hér hafi verið betur staðið að verki en í Bretlandi og Bandaríkjunum t.d. hvað varðar þéttleika steypu, framkvæmd o.fl. þannig að raunsprungur séu minni og minni líkur á að tærandi efni nái til kaplanna.

Sterk rök virðast hníga að innleiðingu ídráttarröra úr plasti í allar nýjar brýr Vegagerðarinnar í ljósi þess sem hefur verið tekið saman hér að framan. Skoða þarf hvaða kerfi eru fánleg, samsetningar þeirra, tengingar við festur og ventla og hvort þau uppfylli a.m.k. kröfur sem settar eru fram í fib bulletin no. 7<sup>(3)</sup> og síðar kröfur staðla sem unnið er að í þessu samhengi.

### Grauturinn:

Krafa er gerð um það í nokkrum fylkjum Bandaríkjanna að notaður sé forgerður grautur til þess að tryggja aukin gæði. Það sama á við um Bretland, þar sem hætt var notkun grauts sem framleiddur er á verkstað um 1992. Hér á landi eru tiltölulegar fáar brýr byggðar á hverju ári, aðstæður oft erfiðar veðurfarslega og því rök fyrir því að eyða áhættuþáttum og skoða hvar unnt er að fá hentugan, vottaðan verksmiðjuframleiddan graut sem framleiddur er við bestu aðstæður. Í framhaldinu þarf að fá sýnishorn til prófunar.

### Festur:

Skv. heimildum hér að framan virðist köplum innan við akkeri tiltölulega oft hafa verið hætt. Svo virðist sem einfalt sé að breyta frágangi festa þannig að þar sé marglaga vörn og það virðist því sjálfgefið að skoða nánar.

## 7 Lokaorð

Að lokum þakka ég vinnufélögum mínum á Hönnunardeild Vegagerðarinnar þeim Guðmundi Val Guðmundssyni verkfræðingi og Kristjáni Kristjánssyni forstöðumanni Hönnunardeildar kærlega fyrir yfirlesturinn og ágætar ábendingar.



## Tilvísanir:

1. [ÍST EN 523](#), *Steel strip sheaths for prestressing tendons - Terminology, requirements, quality control*
2. [ÍST EN 524](#), *Steel strip sheaths for prestressing tendons - Test methods - Part 6: Determination of leaktightness (Determination of water loss)*.
3. [Technical report, Bulletin 7](#), *Corrugated plastic ducts for internal bonded post tensioning, 2000, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne 2000*
4. [Technical report, fib Bulletin 33](#), *Durability of post-tensioning tendons, Lausanne, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne 2006*
5. [Forsenic Engineering Volume 166](#), *Post-tensioned structures – improved standards* eftir Gordon Marshall Clark
6. [Technical Report No. 47](#), *Durable post-tensioned concrete bridges*, Concrete Society, 1996
7. [Technical Report No. 72](#), *Durable Post-tensioned Concrete Structures*, Concrete Society, 2010
8. [Prestressed Concrete Bridges, Design and construction, Second edition 2012](#), Nigel Hewson, ICE publishing
9. [Project Summary Report O-1405-S](#), *Durability Design of Post-Tensioning Bridge Substructure Elements*, Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research við The University of Texas at Austin, 2004
10. [Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual](#), U.S Department of Transportation, The Federal Highway Administration, 2013.
11. [VSL Post Tensioning Solutions](#), heimasíða VSL