

Ástand spennikapla í steyptum brúm

Nóvember 2015

Rannsóknarverkefni styrkt af Vegagerðinni



SKÝRSLA - UPPLÝSINGABLAÐ

Titill skýrslu Rannsóknarverkefni – Ástand spennikapla í steyptum brúm		Tegund skýrslu				
Verkheiti Rannsóknarverkefni - Ástand spennikapla í steyptum brúm		Verkkaupi Vegagerðin				
Verkefnisstjóri - EFLA Baldvin Einarsson	Verkefnisstjóri / fulltrúi verkkaupa Guðmundur Valur Guðmundsson					
Höfundur Kristján Steinn Magnússon	Skýrslunúmer 001	Verknúmer 2970-160	Fjöldi síðna 32			
<p>Útdráttur</p> <p>Í íslenska vegakerfinu eru samtals í kringum 1200 brýr og samanlögð lengd þeirra er yfir 30 km. Margar af þessum brúm eru svokallaðar eftirspenntar brýr, þ.e. í steyptri yfirbyggingu þeirra eru ídráttarrör með spenniköplum úr stáli. Þessir kaplar eru spennir upp og þjóna þeim tilgangi að minnka togspennur í steypunni. Á Íslandi hefur eftirlit með spenniköplum ekki verið til staðar og nú eru margar eftirspenntar brýr í íslenska vegakerfinu komnar á þann aldur að nauðsynlegt er að gefa þessum málaflokki aukinn gaum. Þessi skýrsla veitir yfirlit yfir algengar aðferðir sem beitt hefur verið við eftirlit með eftirspenntum brúm. Stuðst er við skýrslur, bækur og fræðigreinar þar sem aðferðunum er lýst, fræðilegur bakgrunnur þeirra útskýrður og greint frá niðurstöðum fyrri prófana. Aðferðirnar eru metnar út frá kostnaði, tíma, nauðsynlegri þjálfun og þekkingu mælenda, nákvæmni og umfangi niðurstaðna, reynslu og nauðsynlegu aðgengi. Er það mat skýrsluhöfundar að mestur hagr sé í að taka sjónrænt mat, impact-echo aðferðina og ultrasonic-imaging aðferðina til frekari skoðunar með eftirlit með íslenskum brúm í huga og jafnframt segulstraumlekaaðferð ef miklar skemmdir á graut í ídráttarrörum koma í ljós. Einnig mætti skoða acoustic-emission aðferðina nánar m.t.t. vöktunar á brúarmannvirkjum.</p>						
Lykilorð						
Staða skýrslu <input type="checkbox"/> Í vinnslu <input type="checkbox"/> Drög til yfirlstrar <input checked="" type="checkbox"/> Lokið		Dreifing skýrslu og upplýsingablaðs <input type="checkbox"/> Opin <input checked="" type="checkbox"/> Dreifing með leyfi verkkaupa <input type="checkbox"/> Trúnaðarmál				
Útgáfusaga ● ● ● ● ●						
Nr.	Höfundur		Rýnt		Samþykkt	
	Nafn	Dags.	Nafn	Dags.	Nafn	Dags.
	Kristján Steinn Magnússon	31.8.15	Baldvin Einarsson	31.8.15	Baldvin Einarsson	5.11.15

Efnisyfirlit

ÚTDRÁTTUR.....	3
MYNDASKRÁ.....	4
TÖFLUSKRÁ	5
1. INNGANGUR.....	6
2. ALMENNT UM EFTIRSPENNTAR BRÝR	7
3. AÐFERÐIR	8
4. GÖGN.....	9
5. SKAÐLAUSAR (NDT)-AÐFERÐIR.....	10
5.1. Sjónrænar aðferðir.....	10
5.1.1. Sjónrænt mat	10
5.2. Segulviðsaðferðir	11
5.2.1. Segulstraumlekaaðferð.....	11
5.3. Mekanískar bylgju-/titringsaðferðir	13
5.3.1. Acoustic-sounding aðferð	13
5.3.2. Acoustic-emission aðferð.....	14
5.3.3. Impact-echo aðferð	17
5.3.4. Impulse-response aðferð	19
5.3.5. Ultrasonic-imaging aðferð	20
5.3.6. Ultrasonic-guided-wave aðferð.....	22
5.4. Rafsegulbylgjuaðferðir	23
5.4.1. Impulse-radar (GPR)-aðferð	23
5.5. Elektrókemískar aðferðir.....	24
5.6. Geislunaraðferðir	25
5.6.1. Myndgreiningaraðferð	25
5.7. Aðferðir sem ákvarða togkrafta í spenniköplum	28
5.7.1. X-ray-diffraction aðferð.....	28
5.7.2. Direct-pre-stress-measurement aðferð	28
6. NIÐURSTÖÐUR.....	29
7. HEIMILDASKRÁ.....	30

Útdráttur

Í íslenska vegakerfinu eru samtals í kringum 1200 brýr og samanlögð lengd þeirra er yfir 30 km. Margar af þessum brúm eru svokallaðar eftirspennnar brýr, þ.e. í steyptri yfirbyggingu þeirra eru ídráttarrör með spenniköplum úr stáli. Þessir kaplar eru spenntir upp og þjóna þeim tilgangi að minnka togspennur í steypunni. Á Íslandi hefur eftirlit með spenniköplum ekki verið til staðar og nú eru margar eftirspennnar brýr í íslenska vegakerfinu komnar á þann aldur að nauðsynlegt er að gefa þessum málaflokki aukinn gaum. Þessi skýrsla veitir yfirlit yfir algengar aðferðir sem beitt hefur verið við eftirlit á eftirspenntum brúm. Stuðst er við skýrslur, bækur og fræðigreinar þar sem aðferðunum er lýst, fræðilegur bakgrunnur þeirra útskýrður og greint frá niðurstöðum fyrri prófana. Aðferðirnar eru metnar út frá kostnaði, tíma, nauðsynlegri hjálfun og þekkingu mælenda, nákvæmni og umfangi niðurstaðna, reynslu og nauðsynlegu aðgengi. Er það mat skýrsluhöfundar að mestur hagur sé í að taka sjónrænt mat, impact-echo aðferðina og ultrasonic-imaging aðferðina til frekari skoðunar með eftirlit með íslenskum brúm í huga og jafnframt segulstraumlekaaðferð ef miklar skemmdir á graut í ídráttarrörum koma í ljós. Einnig mætti skoða acoustic-emission aðferðina nánar m.t.t. vöktunar á brúarmannvirkjum.

Myndaskrá

Mynd 1 - Þversnið í steypu sem inniheldur spennikapal í ídráttarröri.	7
Mynd 2 - Hugmyndin á bak við MFL-aðferðina.	12
Mynd 3 - Skematísk mynd af aðferðinni og ákvörðun á upptökum með mörgum nemum (Azizinamini og Gull, 2012).	15
Mynd 4 - Uppsetning á búnaði fyrir acoustic-emission aðferðina.	15
Mynd 5 - Lestarbrúin í Huntingdon þar sem búnaðurinn var prófaður.....	16
Mynd 6 - Skematísk mynd af uppsetningu impact-echo búnaðar (DMJM, 2003).....	18
Mynd 7 - Nauðsynlegur búnaður fyrir ultrasonic-imaging aðferðina (Rapaport, 2013).....	21
Mynd 8 - Skýring á því hvernig myndgreining með röntgengeislum virkar.	26
Mynd 9 - Mynd frá prófunum í Fort Lauderdale ásamt sýnishorni af röntgenmynd.	27

Töfluskra

Tafla 1 - Kostir og gallar sjónræns mats.	11
Tafla 2 - Kostir og gallar segulstraumlekaaðferðar.....	13
Tafla 3 - Kostir og gallar acoustic-sounding aðferðarinnar.	14
Tafla 4 - Kostir og gallar acoustic-emission aðferðarinnar.....	16
Tafla 5 - Kostir og gallar Impact-echo aðferðarinnar.	19
Tafla 6 - Kostir og gallar impulse-response aðferðarinnar.	20
Tafla 7 - Kostir og gallar ultrasonic-imaging aðferðarinnar.	22
Tafla 8 - Kostir og gallar ultrasonic-guided-wave aðferðarinnar.....	23
Tafla 9 - Kostir og gallar impulse radar (GPR)-aðferðarinnar.....	24
Tafla 10 - Kostir og gallar elektrókemískra aðferða.	25
Tafla 11 - Kostir og gallar myndgreiningaraðferðar.	27

1. Inngangur

Í íslenska vegakerfinu eru samtals í kringum 1200 brýr og samanlögð lengd þeirra er yfir 30 km (Vegagerðin, 2011). Margar af þessum brúm eru svokallaðar eftirspenntar brýr, þ.e. í steyptri yfirbyggingu þeirra eru ídráttarrör með spenniköplum úr stáli. Þessir kaplar eru spennir upp og þjóna þeim tilgangi að minnka togspennur í steypunni. Eftir að framkvæmdum við eftirspennta brú lýkur getur reynst erfitt að fylgjast með ástandi slíkra kapla án þess að skaða brúna sjálfa. Nokkrar skaðlausar prófunaraðferðir (e. Non-Destructive Testing Methods, NDT) hafa verið þróaðar og þeim beitt á brýr erlendis. Á Íslandi hefur eftirlit með spenniköplum ekki verið til staðar og nú eru margar eftirspenntar brýr í íslenska vegakerfinu komnar á þann aldur að nauðsynlegt er að gefa þessum málaflokki aukinn gaum.

Fyrsta brúin á Íslandi úr eftirspenntri steypu er brú á Blöndu hjá Blönduósi sem byggð var árið 1963. Hún var þá haf lengsta bitabru landsins en miðjuhaf hennar er um 37 m. Síðan þá hefur fjöldi slíkra brúa verið byggður og frá 1980 eru eftirspenntar brýr líklega algengasta burðarform brúa fyrir haf lengdir yfir 20 m. Þegar allt er talið eru eftirspenntar brýr á Íslandi rúmlega 150 talsins og þar af eru 35 þeirra 30 ára eða eldri. Flestar stærri brýr landsins sem byggðar hafa verið síðustu árin eru eftirspenntar, s.s. ný brú á Hvítá hjá Bræðratungu (2010, 270 m), brú á Gígjukvísl (1998, 336 m), brú á Dýrafjörð (1990, 120 m) og brú á Ölfusárós (1988, 360 m). Þá eru flestar vegamótabrýr á höfuðborgarsvæðinu af þessari gerð. Mikil verðmæti eru því fólgin í þessum brúm.

Elsta brúin á Blöndu er orðin 52 ára gömul og margar þeirra eru milli 30 og 40 ára. Þær eru ekki hannaðar samkvæmt núgildandi stöðlum eða byggðar samkvæmt verklýsingum sem byggjast á nýjustu þekkingu á þessu sviði. Þá hefur umferðarálag aukist og því ekki sjálfgefið að um sama áreiðanleika sé að ræða og fyrir nýjar brýr. Þegar eftirspenntar brýr eru vel hannaðar og framkvæmd tekst vel þá eru þær endingargóðar og viðhaldslitlar í langan tíma eins og reynsla Vegagerðarinnar sýnir ásamt vinsældum þessarar tegundar brúa.

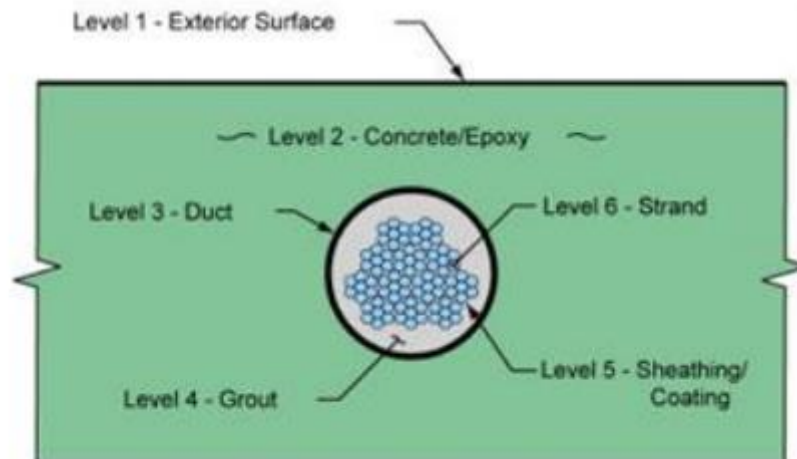
Fyrstu eftirspennu brýrnar voru þróaðar af Eugene Freyssinet eftir 1930 og fyrstu brýrnar byggðar með þeirri tækni sem nú er notuð voru byggðar milli 1945 og 1950. Í Evrópu og á Bretlandseyjum uppgötvaðist tæring í mörgum eftirspenntum brúm um og eftir 1980 sem leiddi til töluverðra áhyggja af langtíma endingu þessarar tegundar brúa.

Það hvernig staðið er að framkvæmd við eftirspennu og grautun hefur mikil áhrif á endingu og gæði mannvirkisins og er gerð krafa í verklýsingum (Alverk) um að einungis fagmenn með reynslu af slíkri vinnu megi standa fyrir verki hverju sinni. Ídráttarrör geta skemmst, vírþræðir geta slitnað, holrými geta myndast þegar verið er að dæla grautum í rörin og þannig geta myndast aðstæður fyrir tæringu í stálvírnum.

Markmiðið með þessari rannsókn er að veita yfirlit yfir þær NDT-aðferðir sem beitt hefur verið á brýr erlendis og meta hentugleika þeirra út frá mismunandi þáttum og ekki síst leggja mat á hverjar þeirra henta best til eftirlits á íslenskum brúm. Fyrst verður fjallað stuttlega um eftirspenntar brýr almennt. Því næst er fjallað um aðferðafræði rannsóknarinnar og matskvarði til samanburðar á mismunandi aðferðum skilgreindur. Síðan er fjallað ítarlega um hverja aðferð fyrir sig, dæmi tekin um notkun hennar og kostir hennar og gallar metnir. Loks eru niðurstöður dregnar saman á einfaldan hátt og mat lagt á hvaða aðferð eða aðferðir þykja henta best fyrir íslenskar aðstæður miðað við forsendur rannsóknarinnar. Í viðauka má svo finna dæmi um aðila sem veita þjónustu er varðar hverja aðferð fyrir sig.

2. Almennt um eftirspenntar brýr

Í grundvallaratriðum virka eftirspenntar brýr þannig að ídráttarrör úr stáli, plasti eða áli eru látin liggja þannig eftir endilöngu brúardekkinu að staðsetning þess í þversniði er ávallt þar sem steypa er í togi. Eftir að steypa hefur harðnað eru stálkaplar þræddir í gegnum rörin og spenntir upp með tjökkum í öðrum eða báðum endum brúarinnar. Síðan er grautað í rörin til að vernda kaplana fyrir tæringu. Spennikaplarnir valda þrýstispennum í steypunni sem vega upp á móti togspennum vegna ytra álags (IAEA, 2002). Erlendis hefur orðið vart við tæringu á spenniköplum vegna ónógrar grautunar, t.d. í Florida-fylki í Bandaríkjunum (Beitelman 2000, DMJM 2003 og Powers o.fl. 2004). Grauturinn nær þá ekki að fylla upp í öll tómarúm í ídráttarrörinu og tæringarvaldar, eins og loft og vatn, eiga því greiða leið að kaplinum. Á mynd 1 má sjá dæmigert þversnið í steypu sem inniheldur spennikapal í ídráttarröri.



Mynd 1 - Þversnið í steypu sem inniheldur spennikapal í ídráttarröri.

Eins og gefur að skilja getur verið erfitt að hafa eftirlit með tæringu á spenniköplum sem eru staðsettir djúpt inni í þversniðinu. Slíkt eftirlit er þó æskilegt þar sem tæring á spenniköplum getur haft gríðarlega alvarlegar afleiðingar og jafnvel leitt til fyrirvaralausss hruns viðkomandi mannvirkis. Árið 1991 hrundi Melle-brúin í Belgíu í einni svipan þrátt fyrir að vera einungis undir álagi frá einum olíubíl. Sprenging varð í olíubílnum og ökumaður hans lést. Hrun brúarinnar mátti rekja til þess að hálkusalt átti nokkuð greiðan aðgang að spenniköplum hennar og tærði þá umtalsvert (De Schutter, 2013). Þetta tiltekna dæmi undirstrikar, ásamt fleirum, mikilvægi þess að vakta ástand spennikapla í eftirspenntum brúm.

3. Aðferðir

Stuðst er við mat höfundar á mismunandi NDT-aðferðum út frá þeim gögnum sem eru til staðar í fræðigreininni í dag. Leitast er við að draga fram heildstætt yfirlit yfir þær mismunandi aðferðir sem beitt hefur verið á eftirspenntar brýr á undanförunum áratugum. Aðferðirnar eru metnar út frá eftirfarandi þáttum:

- Kostnaður
- Tími
- Nauðsynleg þjálfun/þekking þess sem fer með eftirlit
- Nákvæmni og umfang niðurstaðna
- Reynsla af aðferð
- Nauðsynlegt aðgengi

Stuttlega er fjallað um hverja aðferð út frá sérhverjum þessara þátta og kostir hennar og gallar listaðir upp. Niðurstöðurnar eru svo teknar saman í niðurstöðukafla. Einnig eru í viðauka listaðir upp aðilar sem selja búnað og/eða þjónustu er varðar aðferðirnar.

4. Gögn

Stuðst er við skýrslur, bækur, fræðigreinar o.fl. er varða eftirlit með eftirspennuköplum af netinu. Stór hluti verkefnisins felst í gagnaöflun og flokkun gagna eftir aðferðum. Reynt er fyrir hverja aðferð að varpa ljósi á fræðilegan bakgrunn hennar, í hverju framkvæmd hennar felst, hvaða búnaðar er krafist, hverju hún skilar og dæmi tekin þar sem aðferðinni hefur verið beitt.

5. Skaðlausar (NDT)-aðferðir

5.1. Sjónrænar aðferðir

5.1.1. Sjónrænt mat

Sjónrænt mat er elsta, einfaldasta og algengasta aðferðin við brúareftirlit. Sjónrænt mat er yfirleitt alltaf notað á einhvern hátt sem undanfari nánari eftirlitsaðferða. Reyndur eftirlitsaðili getur ályktað ýmislegt um ástand mannvirkis með grandskoðun á ytra og innra byrði þess þar sem nægjanlegt aðgengi er tryggt. Tækniframfarir hafa svo reitt fram hjálpartæki af ýmsum toga við sjónrænt mat, svo sem myndbandseftirlitskerfi, bæði varanleg og færanleg, róbóta sem komast að annars óaðgengilegum svæðum og speglunarmyndavélar sem þræða má inn í kapalrörin með því að bora gat í brúardekkið, en slíkar aðferðir teljast til Destructive testing (DT) aðferða og verður því ekki fjallað um þær í þessari skýrslu. (Azizinamini og Gull, 2012). Ýmis sjáanleg einkenni á brúarmannvirkjum geta gefið vísbendingu um bágt ástand þeirra, svo sem sprungur, flögnun, dældir, litabreytingar og veðrunareinkenni (IAEA, 2002).

5.1.1.1. *Búnaður og framkvæmd*

Æskilegt er að eftirlitsaðili sé vel búinn af hjálpartækjum áður en lagt er af stað í sjónrænt eftirlit. Tommustokkur, merkipenni eða sprengi, hitamælir, vindmælir, kíkir eða sjónauki, sprunguvíddarmælir og stækkunargler eru dæmi um búnað sem gott er að hafa við höndina. Góð myndavél með viðunandi þýsjunareiginleikum, góðri linsu og jafnvel pólariserandi filter ásamt litakorti til glöggvunar á litabreytingum hjálpar til við að greina frá því sem fyrir augu ber. Loks er að sjálfsögðu æskilegt að hafa meðferðis teikningar af mannvirkinu (IAEA, 2002).

5.1.1.2. *Vettvangsfrásögn*

Þar sem sjónrænt mat er nánast alltaf notað að einhverju leyti við brúareftirlit er ekki tekið neitt sérstakt dæmi hér.

5.1.1.3. *Samantekt um aðferð*

Sjónrænt mat er mjög gagnlegt sem fyrsta skref í ástandsmati brúarmannvirkja og reyndur eftirlitsaðili getur fundið ýmislegt út varðandi ástand þess með hjálp rétta búnaðarins. Í töflu 1 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 1 - Kostir og gallar sjónræns mats.

Kostnaður	Óverulegur
Aðferðin er frekar ódýr þar sem í mörgum tilfellum þarf aðeins einn mann í verkið og nauðsynlegur búnaður er ekki sérlega kostnaðarsamur.	
Tími	Fljótlegt
Ekki sérlega tímafrek aðferð. Ef farið er út í að bora fyrir speglunarmyndavélum og meta innviði kapalröra sjónrænt á þann hátt getur það þó verið tímafrekt.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla æskileg
Töluverðrar þjálfunar og þekkingar krafist. Ýmis varúðarmerki í útliti brúarmannvirkis geta farið fram hjá óþjálfuðu auga.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Í meðallagi
Ekki líklegt að afdráttarlausar og umfangsmiklar niðurstöður um ástand mannvirkisins fái af sjónrænu mati eingöngu. Hentar þó mjög vel sem fyrsta skref og gefur góðar vísendingar fyrir næstu skref í ástandsmati mannvirkisins.	
Reynsla af aðferð	Margprófuð og traust aðferð
Elsta, einfaldasta og algengasta aðferð við ástandseftirlit á brúarmannvirkjum.	
Nauðsynlegt aðgengi	Aðgengi krafist að fleiri en einni hlið
Aðeins er krafist aðgengis að ytra byrði brúarinnar. Nauðsynlegt er þó að komast að fleiri hliðum brúarinnar en bara yfirborði.	

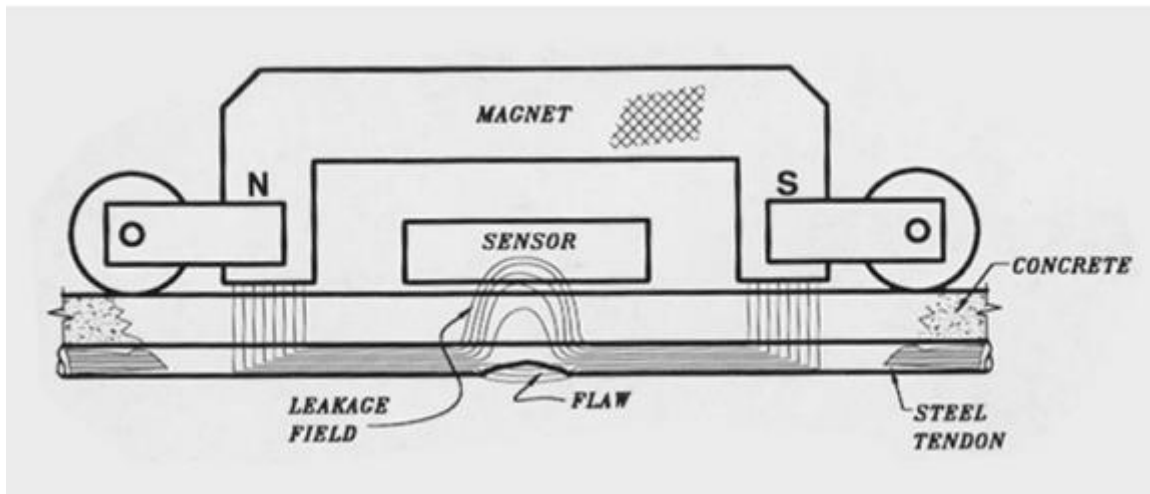
5.2. Segulsviðsaðferðir

5.2.1. Segulstraumlekaaðferð

Segulstraumlekaaðferð (Magnetic Flux Leakage, MFL) er aðferð til að greina skemmdir í stálköplum sem stafa af tæringu. Aðferðinni er ætlað að greina þversniðstap í köplum vegna tæringar og mögulegt slit á einstökum vírum.

5.2.1.1. Fræðilegur bakgrunnur

Þegar utanaðkomandi segulsvið er látið virka á segulvirkan hlut, eins og t.d. eftirspennukapal, þá flæðir segulstraumur eftir honum. Kapallinn virkar sem leið minnsta viðnáms fyrir segulstrauminn. Ef segulstraumurinn er nægjanlega sterkur til að metta kapallinn þá neyðist straumurinn til að flæða út úr kaplinum ef skyndilegt þversniðstap á sér stað, vegna tæringar eða skemmda á kaplinum. Nema í mælitækinu nema þessa breytingu á flæðinu í kaplinum og gefa þannig vísendingu um staðsetningu skemmda. Á mynd 2 má sjá einfalda skýringarmynd af hugmyndinni á bak við aðferðina.



Mynd 2 - Hugmyndin á bakvið MFL aðferðina.

Áhrif steypunnar á segulsviðið eru hverfandi en aðferðin er háð breytum eins og fjarlægð segulgjafa frá spennikaplinum, styrk segulsviðs, staðsetningu og magni járnbandingar og þversniðsflatarmáli spennikapalsins (DMJM, 2003).

5.2.1.2. Búnaður og framkvæmd

Fyrst er lega kapalsins sem skoða á ákvörðuð og merkt með línu á yfirborði. Mælitækið er álkerra á hjólum sem ber seglana, nemann, fartölvu, gagnaöflunareiningu og aflagjafa. Tækinu er rúllað eftir legulínu kapalsins og fastri fjarlægð er haldið á milli nemabúnaðarins og yfirborðs steypunnar. Þetta er mikilvægt því áreiðanleiki gagnanna er háður fjarlægð nemabúnaðarins frá spennikaplinum. Einnig er mikilvægt af sömu ástæðu að línan á yfirborðinu sé nákvæmlega ákvörðuð. Framkvæmd mælingarinnar er fljótleg og mælingarmaður getur labbað á svo til eðlilegum hraða eftir brúardekkinu með kerruna á undan sér. Gögnunum er safnað á tölvuna en töluverðrar sérfræðipækningar er krafist til þess að túlka gögnin á marktækan hátt.

5.2.1.3. Vettvangsfrásögn

Árið 2003 gafst tækifæri til að prófa NDT-aðferðir á raunverulegu mannvirki og sannreyna niðurstöður þeirra þegar taka átti niður þrjár brýr vegna breytinga á Fort Lauderdale-Hollywood alþjóðaflugvellingum í Florida. Rannsakendur notuðu eina af þessum brúm sem „tilraunastofu“ fyrir nokkrar NDT-aðferðir, þ. á m. MFL-aðferðina. Ekki náðist að bera kennsl á þversniðsskerðingu kaplanna undir algjörlega blindum kringumstæðum. Líkleg skýring er að seglar mælitækisins voru ekki nægjanlega öflugir til að segulmetta spennikapalinn. Áður en prófið fór fram á brúnni hafði rannsakandinn ákvarðað að tækið gæti greint þversniðsskerðingu sem næmi 33% eða meira (DMJM, 2003). Aðferðin var einnig prófuð í tilraunastofu af Azizinamini og Gull (2012). 19 stálþráðum var komið fyrir í galvaníseruðu röri sem komið var svo fyrir í stokki ásamt járnbandingu. Gerður var skurður í miðjuna á öllum 19 þráðunum til að líkja eftir skemmd sökum tæringar. Með MFL-aðferðinni náðist, undir þessum ídeal kringumstæðum, að greina skemmdirnar skilmerkilega jafnvel þó járnbanding væri til staðar til að valda truflunum.

5.2.1.4. Samantekt um aðferð

Þrátt fyrir að aðferðin gefi góða raun í tilraunastofuaðstæðum geta komið upp ýmis vandamál þegar henni er beitt á raunveruleg mannvirki. Járnbanding í steypunni getur truflað mælingar, erfitt getur reynst að komast að sumum hlutum kapalsins, eins og t.d. svæðum við akkeri og þá þarf leiðin sem mælitækið fer eftir yfirborðinu að vera mjög nákvæmlega ákvörðuð. Í töflu 2 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 2 - Kostir og gallar segulstraumlekaaðferðar.

Kostnaður	Í meðallagi
Töluvert sérhæfðan búnað þarf til að framkvæma mælingar og getur sá búnaður kostað sitt.	
Tími	Fljótlegt
Mælingamaður getur gengið með mælitækið á nokkuð eðlilegum hraða yfir brúna. Hins vegar getur ákvörðun á staðsetningu kapla á yfirborði verið tímafrek.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla æskileg
Töluverð sérfræðiþekking er nauðsynleg til að túlka mæligögn.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Í meðallagi
Töluvert áreiðanleg leið til að meta tæringu kapla ef hún er umtalsverð. Getur ekki sagt til um sprungur eða holur í graut.	
Reynsla af aðferð	Töluverð
Vinsæl og gamalreynd aðferð við eftirlit með pípum og tönkum. Hefur minna verið notuð við eftirlit með brúm en eitthvað þó.	
Nauðsynlegt aðgengi	Framkvæmanlegt frá yfirborði
Aðgengi er aðeins krafist að yfirborði brúar.	

5.3. Mekanískar bylgju-/títringsaðferðir

5.3.1. Acoustic-sounding aðferð

5.3.1.1. *Búnaður og framkvæmd*

Rannsakandi bankar í yfirborð mannvirkisins með sérstökum hamri og hlustar á hljóðið sem bankið framkallar. Aðferðin reiðir sig á reynslu og þekkingu rannsakandans þar sem hann þarf að leggja huglægt mat á hvers eðlis hljóðið er sem hann heyrir. Aðferðin er ódýr en getur reynst rannsakandanum erfið og tímafrek. Erfitt er að beita aðferðinni á hávaðasömum svæðum, svo sem þar sem mikill umferðarpungi er til staðar. Aðferðinni er aðeins hægt að beita á utanálíggjandi kapla.

5.3.1.2. *Samantekt um aðferð*

Þessari aðferð væri ómögulegt að beita á brýr hér á landi sem hafa sína spennikapla inni í steypunni. Þar sem tilgangur þessarar skýrslu er að veita heildrænt yfirlit yfir mismunandi NDT-aðferðir er hún þó höfð með í upptalningunni. Í töflu 3 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

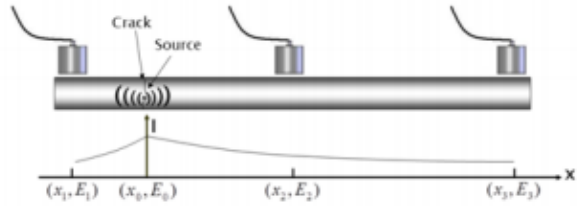
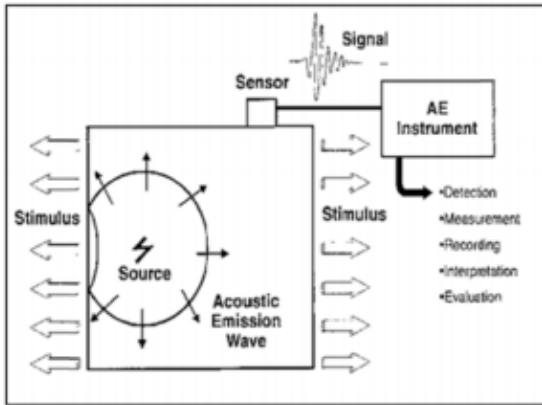
Tafla 3 - Kostir og gallar acoustic-sounding aðferðarinnar.

Kostnaður	Lítill
Aðferðin er frekar ódýr.	
Tími	Tímafrekt
Það er töluvert tímafrekt að ganga á alla kaplana og banka á þá og hlusta.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla nauðsynleg
Rannsakandi þarf að vera mjög næmur á hvers kyns hljóð gefa til kynna skemmdir í kaplinum.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Lélegt
Háð huglægu mati rannsakanda. Reyndur aðili getur borið kennsl á holrúm í rörum. Eingöngu hægt að beita á utanáliggjandi kapalrör.	
Reynsla af aðferð	Töluverð
Gamalreynd aðferð við eftirlit með utanáliggjandi kapalrörum.	
Nauðsynlegt aðgengi	Aðgengi krafist að utanáliggjandi kapalrörum
Aðgengis krafist að utanáliggjandi kapalrörum.	

5.3.2. Acoustic-emission aðferð

5.3.2.1. Fræðilegur bakgrunnur

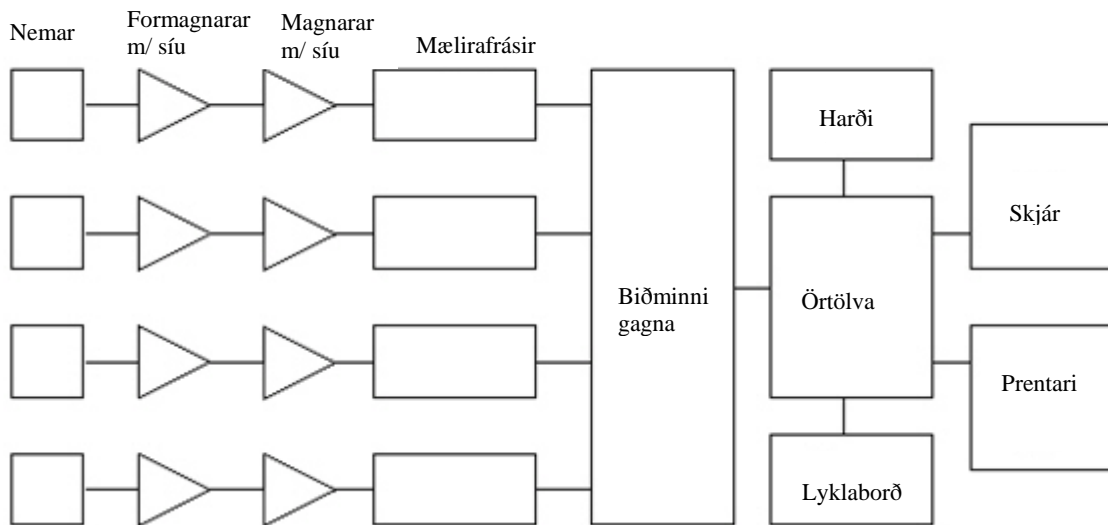
Acoustic-emission aðferðin nýtir sér elastískar bylgjur sem myndast þegar skyndileg endurdreifing á spennum verður í efni. Endurdreifingin á spennunum getur verið af völdum veikingar á spenniköplum vegna tæringar. Bylgjurnar berast upp á yfirborð mannvirkisins þar sem þær valda hreyfingum sem numdar eru af skynjurum. Með réttum búnaði og uppsetningu er hægt að nema hreyfingar af stærðargráðunni 10^{-12} m. Gæta þarf þess við úrvinnslu gagna að sía óviðkomandi truflanir frá umhverfinu sem geta verið umtalsverðar. Acoustic-emission aðferðin sker sig úr öðrum NDT-aðferðum á tvo vegu. Annars vegar er orku ekki veitt um mannvirkið á einhvern hátt líkt og í öðrum aðferðum heldur einfaldlega „hlustað“ eftir orku sem losnar við breytingar í mannvirkinu. Hins vegar nemur aðferðin breytingar á mannvirkinu öfugt við að meta ástand þess á ákveðnum tímapunkti. Þetta hefur í för með sér að með aðferðinni er hægt að greina á milli skemmda sem eru að ágerast og skemmda sem eru stöðugar (NDT Resource Center, e.d.).



Mynd 3 - Skematísk mynd af aðferðinni og ákvörðun á upptökum með mörgum nemum (Azizinamini og Gull, 2012).

5.3.2.2. Búnaður og framkvæmd

Þar sem þessi aðferð nemur aðeins skemmdir sem verða á mannvirkinu eftir uppsetningu tækjabúnaðar en ekki þær sem fyrir voru þarf að gæta þess að vanda valið á staðsetningu nema. Hefðbundin uppsetning á búnaði inniheldur nema, formagnara, síu og magnara ásamt mælíbúnaði, geymsludiskum og skjám. Boðbreytar (e. transducers) í nemunum umbreyta færslu í spennumerki sem er sent í gegnum formagnara, síu og magnara áður en það er mælt og skráð. Algengt er að kerfið sé næmt á tíðnibilinu frá 30 kHz til 1 MHz. (NDT Resource Center, e.d.).



Mynd 4 - Uppsetning á búnaði fyrir acoustic emission aðferðina.

5.3.2.3. Vettvangsfrásögn

Árið 1998 var settur upp acoustic-emission búnaður á lestarbrú í Huntingdon í Bretlandi. Brúin var kjörin fyrir slíkan búnað þar sem þar er mikil umferð og margir þættir í umhverfinu sem henta vel til prófunar á búnaðinum. Prófunin á brúnni gaf góða raun og var það niðurstaða rannsakenda að búnaðurinn gæti á áreiðanlegan hátt skráð, greint, flokkað og staðsett skemmdir í ógrautuðum og illa grautuðum köplum í eftirspenntum brúm. Einnig var búnaðurinn sagður geta fylgst með og numið skemmdir í fullgrautuðum köplum (Cullington o.fl., 1999).



Mynd 5 - Lestarbrúin í Huntingdon þar sem búnaðurinn var prófaður.

5.3.2.4. Samantekt um aðferð

Aðferðin hentar vel sem aðferð til langtímaeftirlits yfir stóran hluta af líftíma mannvirkis. Aðferðin getur ekki numið skemmdir sem hafa komið til áður en búnaðurinn er settur upp og því er ekki víst að aðferðin henti jafn vel á gamlar brýr hér á landi. Ytra umhverfi getur truflað mælibúnaðinn töluvert og því er töluverðrar reynslu krafist við að túlka tilraunagögn. Aðferðin er talsvert rótgróin og traust og hefur reynst áreiðanleg við að greina skemmdir, sérstaklega í ógrautuðum og illa grautuðum köplum. Í töflu 4 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 4 - Kostir og gallar acoustic-emission aðferðarinnar.

Kostnaður	Mikill
Aðferðin er frekar dýr.	
Tími	Tímafrekt
Aðferðin er hugsuð sem langtímaeftirlit og er ófær um að greina skemmdir til komnar fyrir uppsetningu búnaðar.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Reynsla æskileg
Reynsla er æskileg við túlkum á gögnum þar sem margir þættir í umhverfi geta skekkt mælingar.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Mjög gott
Prófanir, bæði á tilraunastofum og á raunverulegum mannvirkjum, hafa sýnt fram á áreiðanleika aðferðarinnar við að greina skemmdir í eftirspennnum köplum.	
Reynsla af aðferð	Margprófuð og traust aðferð
Aðferðin hefur verið notuð bæði lengi og víða.	
Nauðsynlegt aðgengi	Einungis í upphafi
Setja þarf búnaðinn upp í fyrstu en að því loknu er sérstaks aðgengis ekki krafist.	

5.3.3. Impact-echo aðferð

Impact-echo aðferðin er algeng aðferð við að staðsetja skemmdir í grautun í ídráttarrörum uppspennta mannvirkja. Aðferðin gengur í stuttu máli út á að banka í steypuna með hamri og mæla færsluna sem höggið veldur á yfirborði steypunnar. Aðferðinni hefur verið beitt með árangursríkum hætti á grautuð ídráttarrör í brúm (Carino og Sansalone 1992, Olson o.fl. 2011).

5.3.3.1. Fræðilegur bakgrunnur

Aðferðin byggir á titringssvörun steypunnar þegar hún verður fyrir höggi. Höggið myndar P-bylgjur, S-bylgjur og yfirborðsbylgjur sem breiðast út eftir steypunni. Svörun steypunnar er mæld með færslunema á yfirborðinu. Fourier-ummyndun á tímasvörunarmerkinu varpar því á útslags-tíðnigraf. Þar birtast ráðandi tíðnir sem toppar á tíðnirófinu. Topparnir samsvara dýpt niður á endurkastandi yfirborð, sem geta verið holur í graut eða neðri brún plötunnar, út frá jöfnu 1:

$$d = \frac{V}{2f} \quad (1)$$

þar sem

d er fjarlægð

f er ráðandi tíðni

V er bylgjuhraði í steypunni

Ef neminn er of nálægt höggpunktinum getur mælingin orðið ómarktæk þar sem boðbreytirinn titrar ennþá eftir höggið. Höggið sjálf hefur mikið að segja um árangur mælingarinnar. Því styttri sem snertitími er í högginu því breiðara er tíðnibilið frá högginu. Áætluð hæsta tíðni sem örvuð er með högginu er andhverfan af snertitímanum:

$$f_{max} = \frac{1}{t_D} \quad (2)$$

þar sem

t_D er snertitími

f_{max} er hæsta tíðni

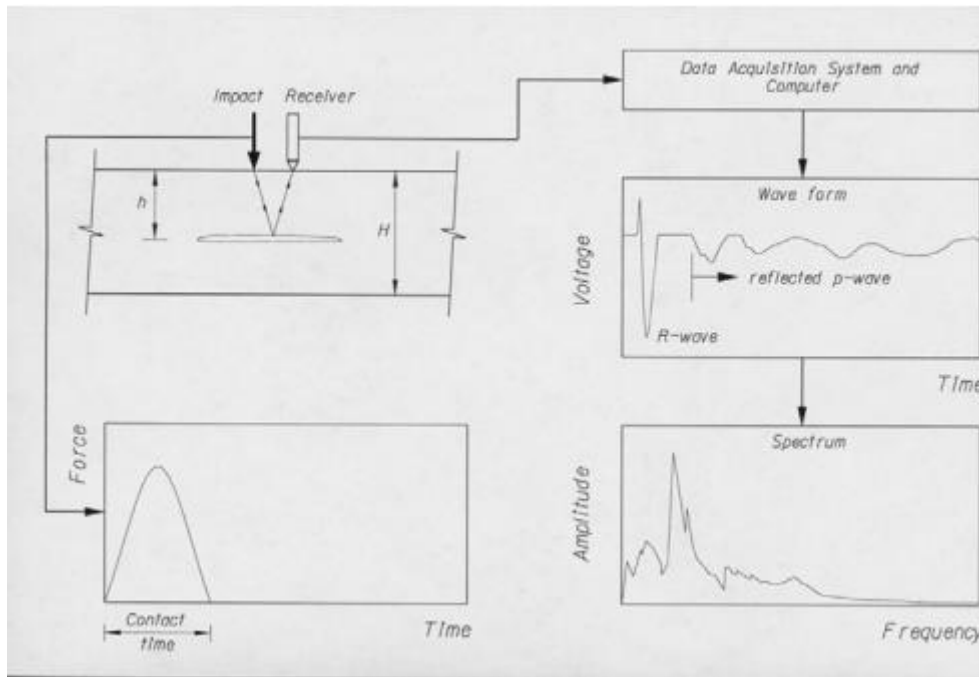
Sansalone og Street (1997) settu fram nálgun á hæstu tíðni fyrir högg frá stálkúlu með þvermál D:

$$f_{max}(kHz) = \frac{291}{D (mm)} \quad (3)$$

Það er því snertitími höggsins sem er ráðandi varðandi það á hve miklu dýpi má greina skemmdir með impact-echo aðferðinni. Eftir því sem snertitíminn minnkar, hækkar hæsta tíðnin og mesta dýpi þar sem greina má skemmd minnkar. (IAEA, 2002).

5.3.3.2. Búnaður og framkvæmd

Búnaðurinn sem notaður er í impact-echo athugun samanstendur af stálkúlum með mismunandi þvermál sem veita höggið, boðbreyti sem nemur svörunina frá högginu, tölvu og gagnaöflunarbúnaði. Hægt er að fá bæði handstýrðan búnað og búnað sem dreginn er eftir brúargólfinu.



Mynd 6 - Skematísk mynd af uppsetningu impact-echo búnaðar (DMJM, 2003).

Áður en lagt er af stað með búnaðinn eftir brúargólfinu þarf að prófa sig áfram með þvermál stálkúlunnar þar til greinilegri ráðandi tíðni er náð. Vanalega eykst nauðsynlegt þvermál kúlunnar eftir því sem platan sem er verið að skoða er þykkari til að ná fram endurkasti af neðra borði hennar. Búnaðurinn er svo annað hvort dreginn eftir brúardekkinu eða þá að mælingamaður gengur eftir gólfinu og mælir með reglulegu millibili. Gögnunum er svo safnað á tölvu til greiningar og úrvinnslu.

5.3.3.3. Vettvangsfrásögn

Á sama stað og segulstraumlekaaðferðin var prófuð, þ.e. á brú sem átti að rífa við Fort Lauderdale flugvöllinn, var einnig gerð prófun með impact-echo aðferðinni. Niðurstöður prófunarinnar voru bornar saman við niðurstöður úr kjarnaborun og sjónrænu mati á ástandi brúarinnar. Alls voru mældir 290 punktar á brúnni. Mælingar voru endurteknaðar í sérhverjum mælipunkti þar til þrjár áþekkar mælingar höfðu náðst í punktinum. Þá var reiknuð meðalníðurstaða í punktinum og haldið í næsta punkt. Mælihraði rannsakenda var u.þ.b. 20 punktar á klukkutíma eða nýr mælipunktur á þriggja mínútna fresti. Niðurstöður sýna að með aðferðinni má greina jafnvel minni grautarholur en áður var talið og einnig að aðferðin er fær um að greina holur af margvíslegum stærðum og gerðum. Með aðferðinni náðist að greina 60% af þeim holum sem fundust með kjarnaborun (DMJM, 2003).

5.3.3.4. Samantekt um aðferð

Impact-echo aðferðin hentar vel til þess að bera kennsl á grautarholur í ídráttarrörum fyrir eftirspennna kapla. Stærð sérhvarrar holu, sem skiptir sköpum varðandi hvort hafa beri áhyggjur af henni, er hins vegar erfiðara að ákvarða með aðferðinni. Framkvæmd aðferðarinnar er einföld, búnaðurinn er léttur og meðfærilegur og einungis þarf 2 aðila til að framkvæma prófanir. Í töflu 5 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 5 - Kostir og gallar Impact-echo aðferðarinnar.

Kostnaður	Óskilgreindur
Litlar upplýsingar fundust varðandi kostnað við aðferðina en gera má ráð fyrir að hann sé í samræmi við aðrar svipaðar aðferðir.	
Tími	Fljótlegt
Sýnt hefur verið fram á að tveir mælingamenn geti mælt um 20 mælipunkta á klukkustund, en algengt er að mæla u.þ.b. 3 punkta pr. metra af brú.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla æskileg
Sérfræðiþekkingar er krafist við túlkun á mæligögnum.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Mjög gott
Prófanir, bæði á tilraunastofum og á raunverulegum mannvirkjum, hafa sýnt fram á áreiðanleika aðferðarinnar við að greina grautarholur í ídráttarrörum eftirspenntra kapla.	
Reynsla af aðferð	Margprófuð og traust aðferð
Aðferðin hefur verið notuð bæði lengi og víða.	
Nauðsynlegt aðgengi	Framkvæmanlegt frá yfirborði
Mælingar með aðferðinni eru framkvæmanlegar frá yfirborði	

5.3.4. Impulse-response aðferð

5.3.4.1. Fræðilegur bakgrunnur

Aðferðin byggir á því að P-bylgja er send í gegnum hlutinn sem verið er að prófa með sérstökum hamri. Bylgjan veldur titringssvörun í hlutnum og mælíbúnaður mælir útslag svörunarinnar. Tölva umbreytir gögnunum í tíðniróf með Fast Fourier Transform algorithm þar sem útslagið er sett fram sem „hreyfanleiki“ en hreyfanleiki er skilgreindur sem svörunarhraði deilt með höggkrafti hamarsins. Hreyfanleikinn lýsir tregðu hlutarins til að titra vegna höggs. Meiri hreyfanleiki þýðir minni titringsmótstaða og getur gefið vísbendingu um skemmd í hlutnum sem verið er að prófa (Rapaport, 2013).

5.3.4.2. Búnaður og framkvæmd

Búnaðurinn samanstendur af gúmmíhamri með innbyggðri álagssellu sem getur mælt dýnamíska krafta, hraðaböðbreyti (e. Geophone) sem nemur hreyfingu hornrétt á yfirborðið og tölvu með sérstökum hugbúnaði sem tengd er við magnara, gagnageymslueiningu og grafíska framsetningareiningu (Rapaport, 2013). Aðferðin er bæði einföld og fljótleg í framkvæmd. Net af prófunarpunktum er skilgreint og boðbreytirinn er lagður í sérhvern punkt á meðan hamrinum er beitt á yfirborðið í nágrenni við punktinn. Tölvan vinnur úr gögnunum og reiknar út hreyfanleika í punktinum. Unnið er punkt frá punkti þar til mælt hefur verið í öllum punktum.

5.3.4.3. Vettvangsfrásögn

Illinois Department of Transportation (IDOT) prófaði aðferðina í tilraunastofuaðstæðum og á raunverulegu mannvirki árið 1999. Niðurstöður prófananna gáfu vísbendingar um að impulse-response aðferðin gæti komið að gagni við NDT-efirlit á eftirspenntum brúm (Davis og Petersen, 2003).

5.3.4.4. *Samantekt um aðferð*

Aðferðin er fljótleg og einföld í framkvæmd og ekki virðist vera sérlega flókið að túlka niðurstöður prófana. Nánast ekkert var talað um kostnað við aðferðina í þeim gögnum sem styðja við skýrslu þessa og því er ekki dregin ályktun varðandi hann. Gallinn er sá að aðferðin hefur aðeins bolmagn til að greina tiltölulega stórar skemmdir og er ekki næm á skemmdir í spennikaplarörum sem liggja inni í steypu nema skemmdirnar séu mjög stórar. Það er því ekki líklegt að þessi aðferð sé sérlega hentug fyrir íslenskar brýr með innbyggðum spennikaplarörum. Í töflu 6 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 6 - Kostir og gallar impulse-response aðferðarinnar.

Kostnaður	Óskilgreindur
Litlar upplýsingar fundust varðandi kostnað við aðferðina.	
Tími	Mjög fljótlegt
Aðferðin er fljótleg og einföld í framkvæmd og úrvinnsla gagna tekur örskamma stund.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Reynsla æskileg
Túlkun gagna er ekki sérlega flókin en ákveðin þekking og reynsla er þó æskileg.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Ábótavant
Aðferðin er aðeins fær um að greina tiltölulega stórar skemmdir og er ekki áreiðanleg fyrir innbyggð spennikaplarör.	
Reynsla af aðferð	Töluverð
Töluverð reynsla er af aðferðinni en henni hefur þó lítið verið beitt á brýr með innbyggðum spenniköplum.	
Nauðsynlegt aðgengi	Framkvæmanlegt frá yfirborði
Mælingar með aðferðinni eru framkvæmanlegar frá yfirborði	

5.3.5. *Ultrasonic-imaging aðferð*

5.3.5.1. *Fræðilegur bakgrunnur*

Aðferðin nýtir sér s-bylgjur sem sendar eru í gegnum efnið og endurkastast bæði frá bakhlið efnisins og mögulegum skemmdum innra með því. Ef hraði s-bylgjunnar í gegnum efnið er þekktur má finna út fjarlægð að endurkastfleti í efninu með jöfnu 4:

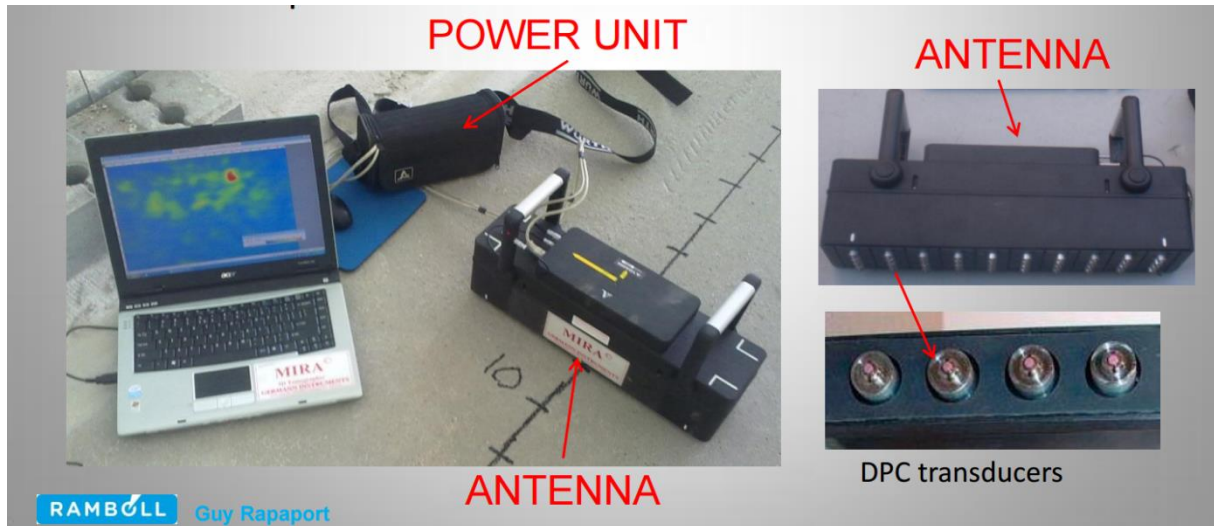
$$d = \frac{v_L}{2T} \quad (4)$$

þar sem T er ferðatími bylgjunnar, v_L er hraði hennar í efninu og d er fjarlægð (IAEA, 2002).

Með því að senda út bylgjur frá vel skilgreindu neti af punktum og nota SAFT tæknina (e. synthetic aperture focusing technique) til að hliðra merkjunum á ákveðin hátt til í tíma má smíða þrívítt líkan af innra byrði efnisins og koma þannig auga á grautarholur í kapalrörum (Azizinamini og Gull, 2012).

5.3.5.2. *Búnaður og framkvæmd*

Búnaðurinn samanstendur af loftneti með 40 boðbreytum (e. transducers) sem ýmist senda frá sér eða nema endurkast frá s-bylgjum, fartölvu, með hugbúnaði sem vinnur úr gögnunum og setur þau grafískt fram, og afleiðingu, með þráðlausum netbeini. Framkvæmd mælinga er tiltölulega einföld, gott er að vera búinn að staðsetja kapalrörið með öðrum NDT-aðferðum og svo er einfaldlega gengið á fyrir fram ákveðna punkta á yfirborðinu og mælingar framkvæmdar í sérhverjum punkti.



Mynd 7 - Nauðsynlegur búnaður fyrir Ultrasonic-imaging aðferðina (Rapaport, 2013).

5.3.5.3. *Vettvangsfrásögn*

Martin o.fl. (2001) prófuðu aðferðina við tilraunastofuaðstæður á tveimur bitum. Niðurstöður prófananna gáfu vísbendingar um hæfni þessarar aðferðar við að staðsetja og bera kennsl á ófullnægjandi grautun í kapalrörum. Rannsakendur benda enn fremur á þörf þess að þróa kerfi sem nýta sér net boðbreyta til að stytta tímann sem krafist er við prófanirnar. Hafa þeir í huga að skýrsla þessi er 14 ára gömul og á þeim tíma hefur einmitt þetta verið gert.

5.3.5.4. *Samantekt um aðferð*

Aðferðin er einföld í framkvæmd en getur orðið tímafrek ef fjöldi mælipunkta er mjög mikill. Því gæti verið hagur í því að beita öðrum NDT-aðferðum til að staðsetja kapalrör og jafnvel velja svæði þar sem meiri líkur eru taldar á skemmdum. Talsverða þekkingu þarf til þess að túlka niðurstöður prófana. Aðferðin er ekki nema í meðallagi dýr miðað við aðrar aðferðir. Þessi aðferð hentar líklega best af öllum við að bera kennsl á mögulegar skemmdir í graut í innbyggðum kapalörum í brúm. Í töflu 7 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 7 - Kostir og gallar ultrasonic-imaging aðferðarinnar.

Kostnaður	Í meðallagi
Gera má ráð fyrir að kostnaður við þessa aðferð sé í samræmi við aðrar sambærilegar NDT-aðferðir.	
Tími	Fljótlegt
Aðferðin er í sjálfu sér mjög fljótleg en ef fjöldi mælipunkta er óhóflegur getur hún orðið tímafrek.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla æskileg
Áreiðanleg túlkun mæligagna krefst þekkingar og reynslu.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Mjög gott
Aðferðin er líklega sú hentugasta af þeim sem hér eru til umræðu til þess að bera kennsl á grautarskemmdir í innbyggðum kapalörum.	
Reynsla af aðferð	Margprófuð og traust aðferð
Aðferðin hefur verið í þróun og notkun í talsverðan tíma og nýtur talsverðrar hylli innan geirans.	
Nauðsynlegt aðgengi	Framkvæmanlegt frá yfirborði
Mælingar með aðferðinni eru framkvæmanlegar frá yfirborði.	

5.3.6. *Ultrasonic-guided-wave aðferð*

Þessi aðferð krefst aðgengis að endum spennikaplanna þar sem bylgjur eru sendar eftir köplunum og endurkast frá þversniðsbreytingum í kaplinum er numið. Þessar þversniðsbreytingar eru væntanlega sökum tæringar og tíminn sem tekur bylgjuna að endurkastast er notaður til að áætla staðsetningu skemmdarinnar. Útslag endurkastsbylgjunnar er notað til að meta umfang skemmdarinnar. Aðferð þessi er ekki talin fýsileg fyrir brýr með innbyggða spennikapla en er þó talin bjóða upp á möguleika við skoðun á spenniköplum í og við akkeri (Azizinamini og Gull, 2012). Í töflu 8 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna fimm sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 8 - Kostir og gallar ultrasonic-guided-wave aðferðarinnar.

Kostnaður	Óskilgreindur
Litlar upplýsingar fundust varðandi kostnað við aðferðina en hann er líklega í samræmi við aðrar svipaðar aðferðir.	
Tími	Í meðallagi
Ekki er líklegt að aðferðin sé sérstaklega tímafrek miðað við aðrar NDT-aðferðir.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla nauðsynleg
Áreiðanleg túlkun mæligagna krefst töluverðrar þekkingar og reynslu.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Óþekkt
Mögulega er hægt að þróa aðferðina þannig að hún gefi áreiðanlegar niðurstöður varðandi skemmdir á köplum í og við akkeri.	
Reynsla af aðferð	Nánast óreynt
Aðferðinni hefur sáralítið verið beitt á brýr með innbyggða spennikapla.	
Nauðsynlegt aðgengi	Aðgengi að kapalendum krafist
Mælingar með aðferðinni eru framkvæmdar frá kapalendum.	

5.4. Rafsegulbylgjuaðferðir

5.4.1. Impulse-radar (GPR)-aðferð

5.4.1.1. Fræðilegur bakgrunnur

GPR-aðferðin byggir á sama prinsippi og radartækni sem notuð er t.d. við flugumferðarstjórn og hraðamælingar á bílum. Loftnet sendir frá sér merki sem endurkastast að hluta til frá því sem verður á vegi þess. Endurkastið er síðan greint og mynd af efninu sem mælt er er framkölluð. Fyrir skoðanir á steypu er merkið FM bylgja á bilinu 500MHz-1GHz. Hægt er að framkalla bæði 2D og 3D af því sem verið er að skoða.

5.4.1.2. Búnaður og framkvæmd

Búnaðurinn samanstendur af loftneti sem bæði sendir frá sér merki og tekur við endurkasti þess, tölva sem vinnur úr gögnum, drifi sem geymir gögnin og því sem á ensku kallast oscillographic recorder. Framkvæmd aðferðarinnar er keimlík því sem áður hefur verið lýst fyrir aðrar bylgjuaðferðir, þ.e. mælt er í ákveðnum punktum á yfirborði brúarinnar.

5.4.1.3. Vettvangsfrásögn

Í prófuninni sem getið er um í kaflanum um segulstraumlekaaðferð þar sem nokkrar NDT-aðferðir voru prófaðar var einnig framkvæmd GPR-prófun. Hraði prófunarinnar reyndist vera um 15 mínútur pr. 30 m af kapli og í þeim 50 punktum þar sem aðferðin gaf merki um að kapal væri að finna reyndist vera kapall í 40 punktum sem þýðir nákvæmni upp á 80%. Í 7 af hinum 10 punktum reyndist vera um kapal í þverstefnu að ræða, í 2 punktum var enginn kapall og 1 punkti var sleppt vegna tímahraks.

5.4.1.4. Samantekt um aðferð

Aðferðin er töluvert hagkvæm og fljótleg til þess að staðsetja innbyggða spennikapla í brúm. Aðferðin veitir ekki aðeins upplýsingar um lárétta staðsetningu kapalsins heldur einnig upplýsingar um hve djúpt

hann liggur í brúardekkinu. Þar eð málmar endurkasta radarmerkjum fullkomlega er aðferðin ófær um að veita upplýsingar um ástand kapla í málmrörum og af sömu ástæðu hentar aðferðin illa ef þétt net af steypustyrktarjárnnum liggur yfir kaplinum. Aðferðin hentar því ekki fyrir eftirspenntar brýr á Íslandi þar sem þær eru allar með kapla í blikkrörum. Í töflu 9 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 9 - Kostir og gallar impulse radar (GPR)-aðferðarinnar.

Kostnaður	Lítill
Aðferðin er álitin hagkvæm.	
Tími	Fljótlegt
Aðferðin er álitin fljótleg.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla æskileg
Áreiðanleg túlkun mæligagna krefst þekkingar og reynslu.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Gott
Aðferðin er álitin nokkuð áreiðanleg, sér í lagi fyrir ídráttarrör úr plasti. Í prófun sem lýst er að ofan reyndist aðferðin hafa nákvæmni upp á 80%. Aðferðin hentar ekki á Íslandi vegna notkuna á blikkrörum.	
Reynsla af aðferð	Margprófuð og traust aðferð
Aðferðinni hefur verið beitt á fjölmörg vandamál, ekki einungis NDT-eftirlit á brúm.	
Nauðsynlegt aðgengi	Framkvæmanlegt frá yfirborði
Mælingar með aðferðinni eru framkvæmanlegar frá yfirborði.	

5.5. Elektrókemískar aðferðir

Elektrókemískar aðferðir til að meta tæringu á eftirspennuköplum hafa einungis verið prófaðar í tilraunastofuadstæðum og ýmsar hindranir eru í vegi fyrir því að raunhæft sé að beita þessum aðferðum á raunveruleg viðfangsefni. Stærsta hindrunin er sú að kapallinn sem skoða skal þarf að vera tengdur við rafmagn og namar þurfa að vera til staðar í ídráttarrörinu. Þær elektrókemísku aðferðir sem hafa hvað mest verið þróaðar eru *half-cell-potential aðferð*, *linear-polarization-resistance (LPR)-aðferð*, *electro-impedance-spectroscopy* og *electrochemical-noise aðferð*. Þar sem engri þessara aðferða hefur verið beitt á raunverulegt viðfangsefni enn sem komið er verður ekki farið nánar út í þessar aðferðir hér heldur aðeins farið yfir kosti og galla þeirra m.t.t. matsatriðanna 5 sem skilgreind voru í aðferðakaflanum. Þetta má sjá í töflu 10:

Tafla 10 - Kostir og gallar elektrókemískra aðferða.

Kostnaður	Óskilgreindur
Litlar upplýsingar fundust varðandi kostnað við aðferðirnar en ekki er talið líklegt að hann sé verulegur.	
Tími	Óskilgreindur
Erfitt að ákvarða þar sem aðferðunum hefur ekki verið beitt utan tilraunastofa.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla æskileg
Sérfræðiþekkingar er krafist við túlkun á mæligögnum.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Lélegt
Ekki er talið raunhæft að gagnlegar niðurstöður fáiast með því að beita þessum aðferðum á eftirspennnar brýr m.v. þá tækni sem til er í dag.	
Reynsla af aðferð	Nánast óreynt
Aðferðunum hefur enn ekki verið beitt á raunverulega eftirspennna brú.	
Nauðsynlegt aðgengi	Mælibúnaði þarf að koma fyrir á byggingartíma
Bæði er snertingar við kapal krafist við mælingar og einnig þarf að koma fyrir nemum í ídráttarrörin á byggingartíma svo hægt sé að beita aðferðunum.	

5.6. Geislunaraðferðir

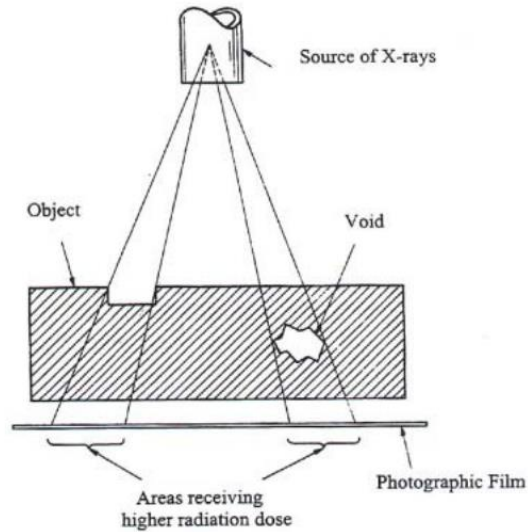
5.6.1. Myndgreiningaraðferð

5.6.1.1. Fræðilegur bakgrunnur

Með myndgreiningaraðferð má nýta sér að straumur af röntgen- eða gammageislum tapar styrk þegar hann berst í gegnum efni. Tapið er háð bæði eiginleikum efnisins sem straumurinn fer í gegnum og þykkt þess. Með því að beina straumi af geislum í gegnum efni og hafa geislunarnæma filmu hinum megin við það má því fá fram mynd af innra ástandi efnisins, á sama hátt og læknar skoða beinin í fólki. Sambandið á milli upphaflegs ljóseindastyrks og styrks ljóseinda sem berast í gegnum efni má sjá í jöfnu 5:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (5)$$

þar sem I er styrkur ljóseinda sem berast í gegnum efni, I_0 er upphaflegur ljóseindastyrkur, μ er deyfni stuðull og x er þykkt efnisins (IAEA, 2002).



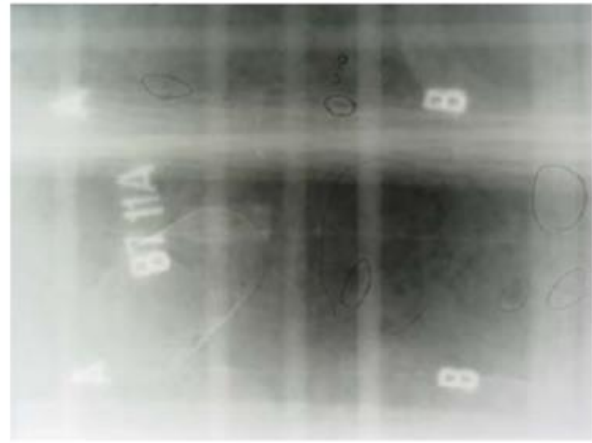
Mynd 8 - Skýring á því hvernig myndgreining með röntgengeislum virkar.

5.6.1.2. **Búnaður og framkvæmd**

Myndgreining er ýmist framkvæmd með röntgengeislum eða gammageislum. Ef notast er við röntgengeisla þá eru þeir framkallaðir með röntgenmyndavél sem hægt er að slökkva og kveikja á en ef notaðir eru gammageislar þá eru þeir framkallaðir af geislavirkri frumefnissamsætu, ýmist Co_{60} , Cs_{137} eða Ir_{192} . Eðlilega er ekki hægt að slökkva og kveikja á samsætunni og skapa gammageislar því aukavandamál er varða geislunarhættu fyrir fólk í nágrenni við mælistað. Einnig er styrkleiki röntgengeislanna meiri en gammageislanna sem nemur stærðargráðu allt að 10^4 . Gammageislabúnaðurinn hefur þó þann kost umfram röntgengeislabúnaðinn að hann er fyrirferðarminni og ódýrari. Vegna þess hve steipt brúardekk eru yfirleitt þykk þá þarf að nota mjög orkumikla geislun, sem þýðir bæði að búnaðurinn verður þungur, fyrirferðarmikill og dýr og einnig að á stóru svæði þarf að vernda fólk gegn geisluninni sem getur þýtt að aðferðin sé ónothæf í þéttbýli (IAEA, 2002).

5.6.1.3. **Vettvangsfrásögn**

Aðferðinni hefur bæði verið beitt á Zárate brúna í Argentínu og á brúnni í Fort Lauderdale sem áður hefur verið getið um í þessari skýrslu. Á báðum stöðum var hægt með aðferðinni að bera kennsl á holrúm í kapalrörunum og skemmdir á spenniköplum (Azizinamini og Gull, 2012). Það er því ljóst að aðferðin býr yfir miklum möguleikum en hennar helsti akkilesarhæll er kostnaður og lýðheilsuáhætta vegna mikillar geislunar á stóru svæði.



Mynd 9 - Mynd frá prófunum í Fort Lauderdale ásamt sýnishorni af röntgenmynd.

5.6.1.4. Samantekt um aðferð

Eins og áður segir býr aðferðin yfir möguleikum til að bera áreiðanleg kennsl á holrúm í kapalrörum og skemmdir á köplunum sjálfum. Hins vegar er staðan þannig í dag að mikill kostnaður og miklar ráðstafanir sem er nauðsynlegt að gera vegna lýðheilsuáhættu sökum geislunar gera það að verkum að ekki er hægt að telja aðferðina fýsilega. Ekki er þó loku fyrir það skotið að framfarir í framtíðinni geri það að verkum að þessi vandamál verði viðráðanleg og að hugsanlega megi þá nýta aðferðina í auknum mæli. Í töflu 11 má sjá yfirlit yfir kosti og galla aðferðarinnar m.t.t. matsatriðanna sex sem skilgreind voru í aðferðakaflanum.

Tafla 11 - Kostir og gallar myndgreiningaraðferðar.

Kostnaður	Umtalsverður
Nauðsynlegur búnaður er mjög dýr og nauðsynlegar aðgerðir til að vernda heilsu borgara geta verið kostnaðarsamar.	
Tími	Tímafrekt
Búnaður er tímafrekur í uppsetningu, langan tíma getur tekið að fá skýra mynd og nauðsynlegar aðgerðir til að vernda heilsu borgara geta verið tímafrekar.	
Nauðsynleg þjálfun/þekking mælanda	Sérfræðiþekking og reynsla æskileg
Sérfræðiþekkingar er krafist við meðhöndlun á búnaði og framkvæmd mælinga. Tiltölulega einfalt er þó að túlka niðurstöður.	
Nákvæmni og umfang niðurstaðna	Mjög gott
Ef mælingar heppnast vel má fá mjög nákvæmar og áreiðanlegar upplýsingar um ástand kapalröranna og kaplanna sjálfra.	
Reynsla af aðferð	Í meðallagi
Mikil reynsla er af aðferðinni í öðrum geirum en einnig nokkur við eftirlit með innbyggðum spenniköplum.	
Nauðsynlegt aðgengi	Mjög mikið
Neikvæð umsögn varðandi aðgengi skýrist af því á hve stóru svæði getur þurft að grípa til ráðstafana vegna lýðheilsuáhættu sökum geislunar.	

5.7. Aðferðir sem ákvarða togkrafta í spenniköplum

Að lokum er fjallað stuttlega um aðferðir sem mæla togkrafta í spennuköplum beint til að ákvarða hvort þeir hafi tapað styrk á þjónustutíma sínum. Ekki er talið líklegt að þessar aðferðir hafi praktískt gildi fyrir íslenskar brýr á þessu stigi en þó er vert að skoða tvær slíkar aðferðir, X-ray-diffraction aðferðina og direct-pre-stress-measurement aðferðina.

5.7.1. X-ray-diffraction aðferð

Þessi aðferð er mikið notuð til að ákvarða spennur í grönnum málmvörum og tengingum í hálfleiðarabúnaði. Með aðferðinni má nákvæmlega ákvarða fjarlægðir milli atómplana í efnunum með kristalsuppbyggingu. Þessar fjarlægðir eru síðan notaðar til að ákvarða elastíska streitu í efninu og henni má svo umbreyta í spennu með viðeigandi fjarlægðarmáli (Azizinamini og Gull, 2012). Með þessu má ákvarða hvort spennikapall hafi tapað einhverju af upphaflegri togspennu og hvort hafa beri áhyggjur af því tapi.

5.7.2. Direct-pre-stress-measurement aðferð

Þessi aðferð byggir á skoðun á spennuástandi umhverfis holu sem boruð er í steypuna. Sprunga er látin myndast í steypunni út frá holunni og með ákveðnum aðferðum má ákvarða spennuástand í steypunni út frá sprungunni. Aðferðin er talin gefa nokkuð nákvæma mynd af spennuástandinu en er þó mjög háð nákvæmri ákvörðun á ákveðnum föstum (Azizinamini og Gull, 2012).

6. Niðurstöður

Hér að framan hafa flestar algengustu NDT-aðferðirnar við eftirlit á eftirspennnum brúm verið kynntar og hæfni þeirra og hagkvæmni metin. Ljóst er að aðferðirnar henta misvel og geta gengt mismunandi hlutverkum við eftirlit. Við raunverulega framkvæmd eftirlits af þessu tagi er engin ein ákveðin aðferð sem trompar allar aðrar heldur er mikilvægt að finna blöndu aðferða sem skilar sem bestum niðurstöðum á sem hagkvæmastan hátt og á sem stystum tíma. Með þessar forsendur að leiðarljósi er lagt til að eftirfarandi aðferðir verði skoðaðar betur með eftirlit með íslenskum brúm í huga.

Sjónrænt mat

Rökréttasta upphafið á hvers kyns eftirliti er sjónræn athugun. Fyrst þarf einfaldlega að fara á staðinn og kanna aðstæður. Passa þarf upp á að útfærsla matsins sé eins og best verður á kosið. Framkvæmd þess þarf að vera í höndum reynds sérfræðings og hann þarf að hafa viðeigandi búnað með í för.

Impact-echo

Þessi aðferð hentar vel til að bera kennsl á holur og skemmdir á graut í kapalrörum. Aðferðin er fljótleg, kostnaður er hlutfallslega lágur og hún gefur áreiðanlegar niðurstöður. Mikil hagkvæmni felst í því að hægt sé að framkvæma prófanir með aðferðinni frá yfirborði brúarinnar.

Ultrasonic-imaging

Þessi aðferð hentar vel til að bera kennsl á holur og skemmdir á graut í kapalrörum. Aðferðin er fljótleg, kostnaður hlutfallslega lágur og hún gefur áreiðanlegar niðurstöður. Mikil hagkvæmni felst í því að hægt sé að framkvæma prófanir með aðferðinni frá yfirborði brúarinnar. Skoða mætti þessa aðferð í samanburði við impact-echo aðferðina með það að leiðarljósi að ákvarða hvor aðferðin hentar betur hér á landi.

Segulstraumlekaaðferð

Sjónrænt mat og aðferðir til að meta grautarholur ættu að mati höfundar að njóta forgangs. Gefi þær athuganir vísbendingar um miklar skemmdir á graut er þó ástæða til að skoða spennikaplana nánar og þá hentar segulstraumlekaaðferðin vel til þess að leggja mat á tæringu kaplanna, þó aðeins ef um umtalsverða tæringu er að ræða. Hægt er að framkvæma prófanir með þessari aðferð frá yfirborði brúarinnar.

Acoustic-emission

Þessi aðferð væri tilvalin ef vilji væri fyrir því að setja upp kerfi sem hefur stöðugt eftirlit með brúarmannvirki. Slíkt kerfi gæti þó reynst dýrt í rekstri þannig að trygging á fjárhagslegri hagkvæmni væri forsenda fyrir uppsetningu.

7. Heimildaskrá

Aziznamini, A., Gull, J. (2012). „*Improved Inspection Techniques for Steel Prestressing/Post-Tensioning Strand*“. Florida: Florida International University. Sótt þann 1. júní 2015 af http://ntl.bts.gov/lib/46000/46100/46173/FDOT_BDK80_977-13_rptvol1.pdf

Beitelman, T. (2000). *Tensile test results of post tensioning cables from Midbay Bridge*. Tallahassee, FL: Structures Research Center, Florida Department of Transportation. Sótt þann 27. maí 2015 af http://ravenelbridge.net/post_tensioning_midbay_bridge.pdf

Carino, N. J. og Sansalone, M. (1992). Detection of voids in grouted ducts using the impact-echo method. *ACI Materials Journal*, árg.89, tbl. 3, bls. 296-303.

Cullington, D.W., MacNeil, D, Paulson, P. og Elliot, J. (1999). *Continuous acoustic monitoring of grouted post-tensioned concrete bridges*. Huntingdon, England: Pure Technologies ltd. Sótt þann 11. júní 2015 af http://webmail.puretechltd.com/pdf/technical_papers/1999/PTL_Technical_Paper_20080212161642.pdf

Davis, A.G., Petersen, C.G. (2003). *Nondestructive Evaluation of Prestressed Concrete Bridges using Impulse Response*. Illinois: University of Illinois. Sótt þann 23. júní 2015 af <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v013/v013.htm>

De Schutter, G. (2013). *Damage to Concrete Structures*. Taylor&Francis Group. Bls. 31-33.

DMJM Harris (2003). *Test and assessment of NDT methods for post tensioning systems in segmental balanced cantilever concrete bridges*. Tallahassee, FL: Florida Department of Transportation. Sótt þann 27. maí 2015 af <http://www.dot.state.fl.us/structures/Manuals/NDTMethods.pdf>

International Atomic Energy Agency, IAEA (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Bls. 4. Sótt þann 27. maí 2015 af http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-17_web.pdf

Martin, J., Broughton, K. J., Giannopolous, A., Hardy, M. S. A., og Forde, M. C. (2001). “*Ultrasonic tomography of grouted duct posttensioned reinforced concrete bridge beams.*” *NDT&E International*, Tbl. 34, bls. 107-113.

NDT Resource Center (e.d.). *Introduction to Acoustic emission testing*. Sótt þann 10. júní 2015 af https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Intro.htm

Olson, L., Tinkey, Y., and Miller, P. (2011). *Concrete Bridge Condition Assessment with Impact Echo Scanning*. Emerging Technologies for Material, Design, Rehabilitation, and Inspection of Roadway Pavements. Bls. 59-66.

Powers, R.G., Sagiúés, A.A og Virmani, Y.P. (2004). *Corrosion of post-tensioned tendons in Florida Bridges*. Florida Department of Transportation. Sótt þann 27. maí 2015 af <http://www.dot.state.fl.us/statematerialsoffice/administration/resources/library/publications/researchreports/structures/04-475.pdf>

Rapaport, G. (2013). *Non-destructive testing in practice*. [PDF skjal]. Sótt þann 22. júní 2015 af <http://www.nvfnorden.org/library/Files/Utskott-och-tema/Broar/Conference-2013-Helsinki/Rapaport.pdf>

Sansalone, M.J., Streett, W.B. (1997). Use of the impact-echo method and field instrument for nondestructive testing of concrete structures, *Proc. Int. Symp. Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin 1995, bls. 495-502. —“Impact-Echo”, Bullbrier Press, Ithaca, New York.

Vegagerðin (2011). *Brúaskrá – Ýmsar flokkanir brúa*. Vegagerðin. Sótt þann 27. maí 2015 af [http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Bruaskra-ymislegt/\\$file/Bruaskra-ymsarflokkanir.pdf](http://www.vegagerdin.is/Vefur2.nsf/Files/Bruaskra-ymislegt/$file/Bruaskra-ymsarflokkanir.pdf)

Viðauki A

A.1 Dæmi um sölu- og þjónustuaðila

Sjónrænt mat:

- [Ashtead Technology](#)
- [Computerised Information Technology Limited](#)
- [Fidgeon Ltd](#)
- [GE Measurement & Control – Inspection Technologies](#)
- [Goldthorn Electromech](#)
- [Inspectahire Inst Co Ltd](#)
- [Inuktun Europe Ltd](#)
- [Johnson and Allen Ltd](#)
- [MISTRAS Group Ltd](#)
- [Oceanscan Ltd](#)
- [Olympus](#)
- [Operational Excellence \(OPEX\) Group Ltd](#)
- [Phoenix Inspection Systems Limited](#)
- [PTS \(TQM\) Ltd](#)
- [RSL NDT Ltd](#)
- [Sonaspection International Limited](#)
- [Testrade Limited](#)
- [The Validation Centre \(TVC\) Ltd](#)
- [TRAC Oil & Gas Ltd](#)

Segulstraumlekaaðferð:

- [Ashtead Technology](#)
- [Baugh & Weedon](#)
- [Doosan Babcock](#)
- [Inspectahire Inst Co Ltd](#)
- [MFE Enterprises, Inc](#)
- [NDT Consultants Ltd](#)
- [Oceanscan Ltd](#)
- [Olympus](#)
- [PTS \(TQM\) Ltd](#)
- [RSL NDT Ltd](#)
- [Silverwing UK Ltd](#)
- [The Validation Centre \(TVC\) Ltd](#)
- [Vivian A Robinson Electronics](#)

Acoustic-emission aðferð:

- [A V Technology Ltd](#)
- [MISTRAS Group Ltd](#)
- [Operational Excellence \(OPEX\) Group Ltd](#)
- [Parker Hannifin Manufacturing Ltd](#)
- [Sonatest Ltd](#)
- [STROMA](#)
- [TÜV Rheinland Sonovation B.V.](#)

Impact-echo aðferð:

- [Olson Engineering](#)
- [Impact Echo Instruments](#)
- [Germann Instruments](#)

Impulse-response aðferð:

- [Olson Engineering](#)
- [Germann Instruments](#)

Ultrasonic-imaging aðferð:

- [CTL Group](#)
- [ACS](#)
- [Germann Instruments](#)

Impulse-radar aðferð:

- [Olson Engineering](#)

Myndgreiningaraðferð:

- [Aegleteq Ltd](#)
- [Carestream NDT](#)
- [Computerised Information Technology Limited](#)
- [Euroteck Systems UK Limited](#)
- [Fidgeon Ltd](#)
- [Fujifilm UK Ltd](#)
- [GE Measurement & Control – Inspection Technologies](#)
- [Gilligan Engineering Services Ltd](#)
- [High Technology Sources Limited](#)
- [JME Ltd](#)
- [MISTRAS Group Ltd](#)
- [NDT Consultants Ltd](#)
- [NDT Maincal Limited](#)
- [Nikon Metrology](#)
- [North Star Imaging Europe](#)
- [Oceanscan Ltd](#)
- [PTS \(TQM\) Ltd](#)
- [Radiographic Accessories Ltd](#)
- [RSL NDT Ltd](#)
- [Shaw Pipeline Services – a division of ShawCor UK Ltd](#)
- [Sonaspection International Limited](#)
- [Sonatest Ltd](#)
- [Testrade Limited](#)
- [The Validation Centre \(TVC\) Ltd](#)
- [TRAC Oil & Gas Ltd](#)
- [Wardray Premise Ltd](#)