

# Prófanir iðupróar við Hvammsvirkjun

Andri Gunnarsson<sup>a</sup>, Sigurður M. Garðarsson<sup>b</sup>, Gunnar G. Tómasson<sup>c</sup>, and Helgi Jóhannesson<sup>a</sup>

## Fyrirspurnir:

Andri Gunnarsson  
andrigun@lv.is

<sup>a</sup>Landsvirkjun, Þróunardeild, Háaleitisbraut 68, 105 Reykjavík

<sup>b</sup>Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands, Hjarðarhagi 6, 107 Reykjavík

<sup>c</sup>Háskólinn í Reykjavík, Menntavegi 1, 101 Reykjavík

Greinin barst

26. september 2012

Samþykkt til birtingar

12. júní 2013

## ÁGRIP

Straumfræðileg hönnun yfirfalls og iðupróar fyrirhugaðrar Hvammsvirkjunar í Neðri Þjórsá er sannreynd og lokahönnuð með prófunum í straumfræðilíkani (e. physical model) í kvarðanum 1:40.

Líkanið er byggt samkvæmt lögmáli Froude, það er með hlutfall tregðu- og þyngdarafskrafta það sama í líkani og frumgerð. Líkanið nær yfir neðsta hluta inntakslóns Hvammsvirkjunar (Hagalón), aðrennslisskurð inntaks og yfirfalls, yfirfallið sjálft, iðupró neðan þess og skurð sem flytur vatnið aftur í árfarveg Þjórsár. Neðan við iðupróna eru jarðfræðiaðstæður nokkuð góðar, það er, gæði klappar eru talin nægileg til að þola vel áraun vatns rétt neðan við straumstökk (e. hydraulic jump). Vegna þess er áhersla lögð á að rannsaka áhrif þess að stytta iðupróna til að minnka byggingarkostnað mannvirkisins án þess að auka áhættu í rekstri yfirfallsins.

Alls eru fimm lengdir á iðupró rannsakaðar fyrir breitt bil rekstarkilyrða til að meta virkni og hegðun kerfisins sem heildar. Niðurstöður gefa til kynna að stutt iðupró hafi takmarkaða getu til að mynda stöðugt straumstökk, sem nauðsynlegt er til að eyða nægilegri orku áður en vatnið er sett aftur út í farveg árinna. Ennfremur aukast þrýsti- og hraðasveiflur við enda stuttrar iðupróar, sem gefur vísbendingu um að iðupróin sé of stutt og straumstökkið nái ekki að haldast innan hennar. Lengri iðupró myndar hefðbundnara straumstökk og hefur betri tækni á að deyfa þrýstisveiflur í þrónni áður en vatnið rennur út úr henni.

**Lýkilord:** Iðupró, líkantilraunir, yfirfall, lág Froude tala, stífla

## ABSTRACT

The scope of the study conducted is to verify and optimize a low inflow Froude number stilling basin at Hvammur Hydro Electric Project, in southern Iceland, in a physical model. The model is built according to Froude similitude with a scale ratio of 1/40 and represents the approach flow area to the spillway, the spillway, downstream stilling basin and a discharge channel conveying the flow back to the original river channel. The quality of the rock conditions downstream of the stilling basin is expected to be good and therefore the effect of a shorter and less expensive stilling basin is investigated. In total 4 stilling basin lengths were tested at various operating discharges to identify aspects of performance for the basin and downstream channel. Also, two layouts with baffles and chute blocks were tested. Results indicate that a short basin has limited capability to form a hydraulic jump and produce turbulent kinetic energy for energy dissipation. A longer basin forms a more conventional hydraulic jump and is better able to handle the extreme fluctuations of forces before returning the flow back to the riverbed. Furthermore, with decreasing stilling basin length a fluctuating component is measured at the downstream end of the stilling basin indicating sweep out of the hydraulic jump.

**Keywords:** Stilling basin, physical modeling, spillway, low Froude number, dam

## Inngangur

Landsvirkjun fyrirhugar að reisa þrjár virkjanir í neðri hluta Þjórsár, Hvammsvirkjun, Holtavirkjun og Urriðafossvirkjun. Allar þrjár eru fyrirhugaðar sem rennslisvirkjanir með litlum inntakslónum, enda fer miðlun vatns fram á efri hluta vatnasviðsins. Mynd 1 sýnir yfirlit fyrirhugaðra virkjana í Neðri Þjórsá og helstu kennistærðir þeirra. Hvammsvirkjun er efst þessara þriggja virkjana, en hún nýtir fall milli 116 m y.s. og 84 m y.s. Hönnunarrennslis virkjunarinnar er 310 m<sup>3</sup>/s, uppsett afl um 80 MW og framleiðslugeta 660 GWst á ári með tveimur Kaplan vatnsvélum. Hönnunarflóð Hvammsvirkjunar er 2150 m<sup>3</sup>/s (Q<sub>1000</sub>, flóð með þúsund ára endurkomutíma). Flóð með 50 ára endurkomutíma (Q<sub>50</sub>) er 1650 m<sup>3</sup>/s. Fyrir Q<sub>1000</sub> er mesta leyfilega lónhæð í Hagalóni 117,5 m y.s. (flóðvatnsborð), en fyrir Q<sub>50</sub> og minna rennslis er leyfileg lónhæð 116,0 m y.s. (rekstrarvatnsborð). Því má segja að hönnunaratburðir séu tveir fyrir Hvammsvirkjun, þ.e. bæði skilyrði vegna Q<sub>1000</sub> og Q<sub>50</sub>.

Frumhönnun gerir ráð fyrir lokustýrðu yfirfalli til að veita flóðum um lónið og stýra lónhæð. Yfirfallskantur er í 107 m y.s. með þremur 10 m háum og 12 m breiðum geiralokum (e. radial gate). Fyrir neðan lokurnar er steypt iðupró en innan hennar myndast straumstökk sem eyðir umfram orku í rennslinu og ver stíflur og önnur mannvirki fyrir rofi og skemmdum. Hönnun gerir ráð fyrir að straumstökk myndist innan iðupróar fyrir allt rennslis að hönnunarflóði (Q<sub>1000</sub>). Vatninu er síðan veitt um 50 m langan sprengdan skurð aftur í náttúrulegan farveg Þjórsár, en neðst í skurðinum í um 50 m fjarlægð frá enda iðupróar er mangert stýrisnið (e. hydraulic control), sem tryggir að bakvatnsskil

yrði iðupróarinnar (e. tailwater condition) séu ásættanleg fyrir allt rennslis. Séu bakvatnsskilyrði ekki ásættanleg er hætt á því að straumstökkið myndist ekki í iðuprónni og vatnið renni við stríðan straum (e. supercritical flow) út úr henni. Hönnunarforsendur gera ráð fyrir að yfirfallið flytji hönnunarflóðið án nokkurra skemmda á mannvirkjum eða umhverfi þeirra og rennslid í sprengda skurðinum verði við lygnan straum (e. subcritical) fyrir allt rennslis. Mynd 2 sýnir tillögu að lokahönnun við Hvammsvirkjun að loknum líkantilraunum ásamt helstu mannvirkjum og legu þeirra.

Froudetala innrennslis í iðupró er 3,3 fyrir hönnunarflóð (Q<sub>1000</sub>) og 3,8 fyrir Q<sub>50</sub>. Hönnun á iðupró sem í senn er stutt og skilvirk fyrir Froude tölur lægri en 4-5 er krefjandi þar sem straumstökkið sem myndast er veikt, með lítilli orkueyðingu og miklum sveiflum á vatnsborði, þrýstingi og hraða. Fyrir iðuprær með lágur Froude tölur innrennslis mælir USBR (U.S. Bureau of Reclamation) með Type IV þró, sem er iðupró með straumbrjótum, hnöllum og hallandi endavegg (USBR, 1987), (Pillai, Goel, & Dube, 1989).

Til að meta og rannsaka iðupró fyrir Hvammsvirkjun var byggt straumfræðilíkan samkvæmt lögmáli Froude með kvörðunarhlutfalli  $\lambda = 1/40$  til að rannsaka áhrif þess að stytta iðupróna, hver áhrif hnalla og straumbrjóta eru, og eiginleika veika straumstöksins sem myndast í þrónni. Samkvæmt hönnunargögnum frá USBR er ráðlögð lengd iðupróar án hnalla og straumbrjóta fyrir aðstæður sambærilegar þeim við Hvamm 55 m (USBR, 1987), (George, 1978).

Samkvæmt frumathugun á virkjanasvæði Hvammsvirkjunar eru gæði klappar góð þar sem fyrirhugað stæði yfirfalls og iðupróar er. Því er

talið hagkvæmt að gera athuganir á því hvort iðuþró geti og megi vera styttri en almennt er ráðlagt samkvæmt hönnunargögnum. Einn stærsti hluti byggingarkostnaðar við yfirfallið og iðuþróna tengist beint lengd þróarinnar og því eru gerðar athuganir á breytilegri þróarlengd og hvort notkun hnalla og straumbrjóta (e. *chute and baffle blocks*) nýtist til frekari styttingar á þró. Ekki er talið hagkvæmt að nota hnalla og straumbrjóta nema hægt sé að stytta þróna umtalsvert og því eru þeir einungis prófaðir við tvær stystu þróarlengdirnar. Í verkefninu voru einnig aðrir þættir prófaðir til að meta virkni kerfisins, s.s. botnhæð á iðuþró og mismunandi útfærslur á stýrisniði. Niðurstöðum úr þeim athugunum eru ekki gerð skil hér, en frekari umfjöllun er að finna í Gunnarsson (2012) og Gunnarsson o.fl. (2012). Allar stærðir sem settar eru fram í greininni miðast við frumgerðina (e. *prototype*).

er stýrt með tveimur stórum dælum með tíðnibreytum, en með þeim er hægt að stilla rennsli mjög nákvæmlega. Hvor dæla getur dælt allt að 120 l/s. Tveir stórir steyptrir tankar eru í kerfinu, einn uppistöðutankur ofan við líkanið (um 14 m<sup>3</sup>) og annar frávatnstankur neðan við líkanið (um 12 m<sup>3</sup>). Dælnar dæla vatninu úr frávatnstankinum upp í uppistöðutankinn þaðan sem það rennur um líkanið og síðan aftur í frávatnstankinn. Þannig er um lokað kerfi að ræða. Á mynd 3 má sjá ljósmynd af líkaninu. Mynd 4 sýnir yfirlitstekningu af líkaninu og afstöðu helstu hluta þess.

Virkjanir í Neðri Þjórsá

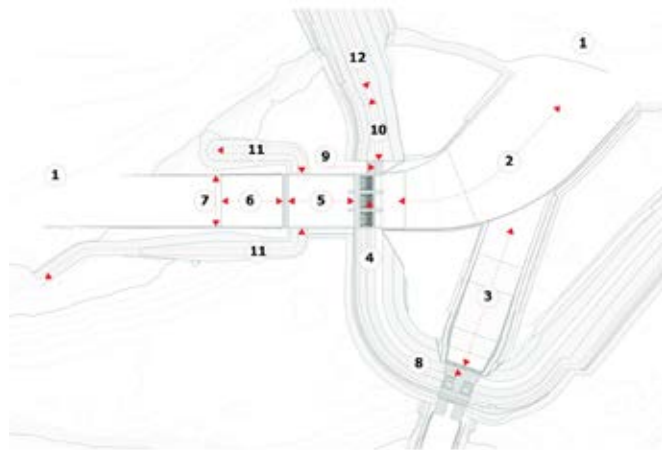


Mynd 1: Fyrirhugaðar virkjanir Landsvirkjunar í Neðri Þjórsá. Hvammsvirkjun er efst í röðinni, svo Holtavirkjun og neðst Urriðafosvirkjun.



Mynd 3: Straumfræðilíkan Hvammsvirkjunar í verklegri aðstöðu Siglingastofnunar Íslands. Fyrir miðri mynd má sjá lokuvirki með geiralokum og iðuþró neðan við lokuvirkið (hvítt á myndinni). Efst á myndinni fyrir miðju sést inntak stöðvarhúss (einnig hvítt á litinn).

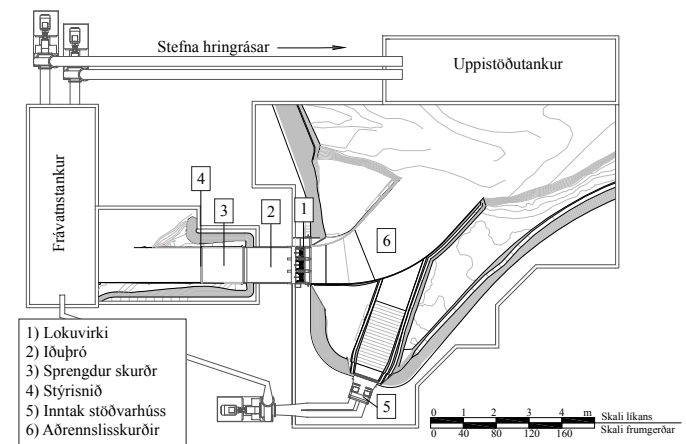
Á yfirfallinu eru þrjár geiralokur sem eru jafnt opnar (e. *interlocked operation*) fyrir öll tilfelli sem hér er fjallað um. Ójöfn opnun á lokum veldur óstöðugum aðstæðum í iðuþrónni, sem hefur áhrif niður í sprengda frárennsliskurðinn fyrir mikið rennsli. Lokurnar stýra rennsli (e. *gated flow*) úr lóninu um yfirfallið upp að 1500 m<sup>3</sup>/s. Fyrir rennsli milli 1500 og 1600 m<sup>3</sup>/s er rennsli um yfirfallið óstöðugt og sveiflast milli þess að vera stýrt af lokunum og renna við frjálst vatnsborð (e. *transition zone*). Við 1600 m<sup>3</sup>/s eru lokurnar komnar upp úr rennslinu og þá verður kerfið aftur stöðugt og afkastageta yfirfallsins ræðst einungis af lónhæð (e. *ungated flow*) en ekki opnun loku. Frumhönnun iðuþróarinnar gerir ráð fyrir 42,5 m breiddi og 50 m langri iðuþró, frá enda yfirfallsbrúnar (e. *ogee toe*) að endavegg iðuþróar (e. *end sill*). Frumhönnunin gerir einnig ráð fyrir að hnallar og straumbrjótar séu ekki í kerfinu. Mangert stýrisnið er 50 m neðan við endavegg iðuþróar sem tryggir nauðsynlegar bakvatnshæðir í iðuþrónni til að varna því að straumstökk fari úr þrónni.



Mynd 2: Tillaga að lokahönnun yfirfalls og nærliggjandi mannvirkja við Hvammsvirkjun: (1) upprunalegur farvegur Þjórsár; (2) aðrennslisskurður yfirfalls; (3) aðrennslisskurður inntaks til stöðvarhúss; (4) lokustýrt flóðvirki; (5) iðuþró; (6) sprengdur skurður fyrir frávatn iðuþróar; (7) stýrisnið í sprengdum skurði; (8) inntak til stöðvarhúss; (9) lítið yfirfall til að tryggja lágmarksrennsli í farvegi Þjórsár; (10) neyðarhaft stíflu (e. *fuse plug*); (11) hlaðnir garðar til að styðja við frárennsli iðuþróar; og (12) Hvammsstífla.

**Aðferðafræði**

Líkantilraunin var framkvæmd í verklegri aðstöðu Siglingastofnunar Íslands yfir 6 mánaða tímabil, frá maí til október 2011. Yfirfallið og inntakið eru smíðuð úr iðnaðarplasti í tölvustýrðri fræsivél, en hliðarveggir iðuþróar eru gerðir úr plexýglerti til að auðvelda sýn inn í kerfið. Aðrir hlutar líkansins, landslag, stíflur og skurðir eru gerðir úr trefjastyrktri steypu, um 25 mm þykkri, byggt á staðnum. Rennsli í kerfinu



Mynd 4: Yfirlit straumfræðilíkans af Hvammsvirkjun í verklegri aðstöðu Siglingastofnunar Íslands. Umfang og helstu hlutar líkansins í rennslisröð eru: (6) aðrennslisskurðir til inntaks og yfirfalls; (5) inntak til stöðvarhúss; (1) lokuvirki með þremur geiralokum; (2) iðuþró neðan við lokuvirki; (3) sprengdur skurður með gördum til stuðnings fyrir rennslið; og (4) mangert stýrisnið neðst í sprengdum skurði til að tryggja bakvatnshæð fyrir iðuþróna.

Tafla 1: Rennsli sem prófuð voru í kerfinu til að meta áhrif styttingar iðuþróar sem og hnalla og straumbrjóta.

Tilfelli	Rennsli	Lónhæð	Endurkomutími / stýring
1	1050 m <sup>3</sup> /s	116,0 m y.s.	Árlegt flóð, lokustýrt rennsli
2	1650 m <sup>3</sup> /s	116,0 m y.s.	50 ára flóð, lokustýrt rennsli
3	2150 m <sup>3</sup> /s	117,5 m y.s.	1000 ára flóð, rennsli við frjálst vatnsborð

Tafla 1 sýnir rennslistilfelli sem prófuð voru til að meta áhrif styttri þróar. Nákvæmir hljóðbylgjumælur (e. *Ultrasonic*) mæla rennslið í líkaninu og vatnshæðir eru mældar með kvörðum. Þrýstinemar í lóninu mæla og fylgjast með lónhæð til að tryggja stöðugleika kerfisins. Straumhraðar eru mældir með Sontek ADV (Acoustic Doppler velocimeter), sem mælir þrívíðan hraða (0,09 cm<sup>3</sup>). ADV hraðamælirinn hefur tök á því að mæla nákvæmt meðaltalsgildi hraða í óstöðugum kerfum eins og straumstökki (García, Cantero, Nino, & García, 2005), (Liu, Zhu, & Rajaratnam, 2002). Hver mæling varir í 60 s á 5 Hz söfnunartíðni, eða alls 300 mæld gildi fyrir hverja mælingu. Mælitækið horfir niður (e. *down looking*) og hefur blint svæði 50 mm frá sjálfu sér. Því var ekki hægt að mæla ofar í vatnssúlu en sem samsvarar 2 m frá yfirborði í frumgerðinni (Sontek, 1997). Í flóknum straumfræðikerfum sem draga inn mikið loft (e. *high air entrainment*), eins og í straumstökki, er geta ADV mæla til að mæla nákvæmlega niður á smæstu kvarða óviss. Upplausn mælinganna er þó talin nægileg til að mæla stóran hluta hreyfiorku iðustreymis og þá sérstaklega þann hluta sem er ráðandi í orkueyðingu straumstökks þó vissulega fari fram einhver orkueyðsla í efsta 2 m yfirborðslagi straumstökks (Nikora & Goring, 1998). Með úrvinnslu mælinganna má leiðrétta fyrir toppum (e. *spikes*) í tímaröðinni sem koma fram þegar loftbólur eru í mælirúmi mælisingis. Mælingar með ADV hraðamæli voru gerðar í miðlínu iðuþróar og skurði neðan við iðuþró. Úrvinnsla gagnanna fór fram með Matlab og WinADV32 (Wahl T. L., 2011).

Þrýstinemum með mikilli nákvæmni (0,05% af fullum skala) var einnig komið fyrir við botn iðuþróar og neðan við hana til að mæla þrýstisveiflur. Þrýstingi er safnað á 10 Hz með 10 m bili í miðlínu mannvirkisins.

Kvaðratrót af meðalhraða í öðru veldi (e. *root mean square, RMS*) er reiknuð til að meta ákafa iðustreymis (e. *turbulence intensity*) og magn hreyfiorku iðustreymis í kerfinu (e. *turbulent kinetic energy*). Reiknað RMS gildi er jafnt staðalfrávikinu hvernar stakrar hraðamælingar. RMS gildið er reiknað samkvæmt:

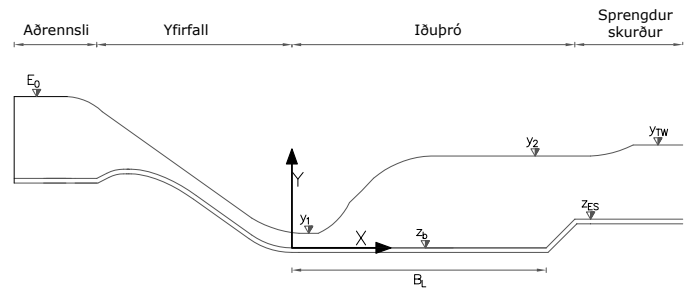
$$RMS'_i = \sqrt{\overline{(v'_i)^2}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2 - (\sum v_i)^2 / n}{n - 1}}$$

þar sem  $i$  er stefna viðkomandi hraða m.v. mælitækið,  $v_i$  er frávik frá meðalhraða og  $n$  er fjöldi mælinga (Wahl T. L., 2000).

Hreyfiorka í iðustreyminu (e. *turbulence kinetic energy, TKE*) er skilgreind sem meðal hreyfiorka á massaeyningu. TKE er ákvarðað af RMS hraðasveiflum í lang- og þversniðum sem og plani. Almenn má meta magn hreyfiorku iðustreymis byggt á meðaltali iðuspenna (e. *turbulence normal stresses*):

$$TKE = \frac{1}{2} \left( \left( \sqrt{\overline{(u'_i)^2}} \right)^2 + \left( \sqrt{\overline{(v'_i)^2}} \right)^2 + \left( \sqrt{\overline{(w'_i)^2}} \right)^2 \right)$$

þar sem TKE er meðal hreyfiorka á massaeyningu og  $u'_i$ ,  $v'_i$  og  $w'_i$  eru frávik frá meðalhraða í  $x$ ,  $y$  og  $z$  stefnu (Urban, Wilhelms, & Gulliver, 2005), (Murzyn & Bélorgey, 2002), (García, o.fl., 2002).



Mynd 5: Yfirlit hnitakerfis iðuþróar.  $E_0$  er orkuhæð í lóni ofan yfirfalls,  $y_1$  er vatnshæð ofan straumstökks (e. *pre jump depth*),  $y_2$  er vatnshæð neðan straumstökks (e. *conjugated depth*),  $y_{TW}$  er bakvatnshæð í sprengdum frárennisskurði.  $Z_b$  er hæð á botni iðuþróar og  $Z_{ES}$  er hæð á endavegg iðuþróar.  $B_1$  er lengd iðuþróar, mæld frá enda yfirfallskants (e. *ogee toe*) að upptökum endaveggs. Endaveggur hallar 1:1 fyrir öll tilfelli.

Tafla 2: Yfirlit þróarlengda sem prófaðar voru til að ákvarða hagkvæmstu þróarlengd við Hvamm og þau tilfelli sem prófuð voru með hnöllum og straumbrjótum. Fyrir öll tilfelli er hæð yfirfallskants 107 m y.s., hæð iðuþróar ( $Z_b$ ) 100 m y.s. og hæð endaveggjar ( $Z_{ES}$ ) 103,1 m y.s.

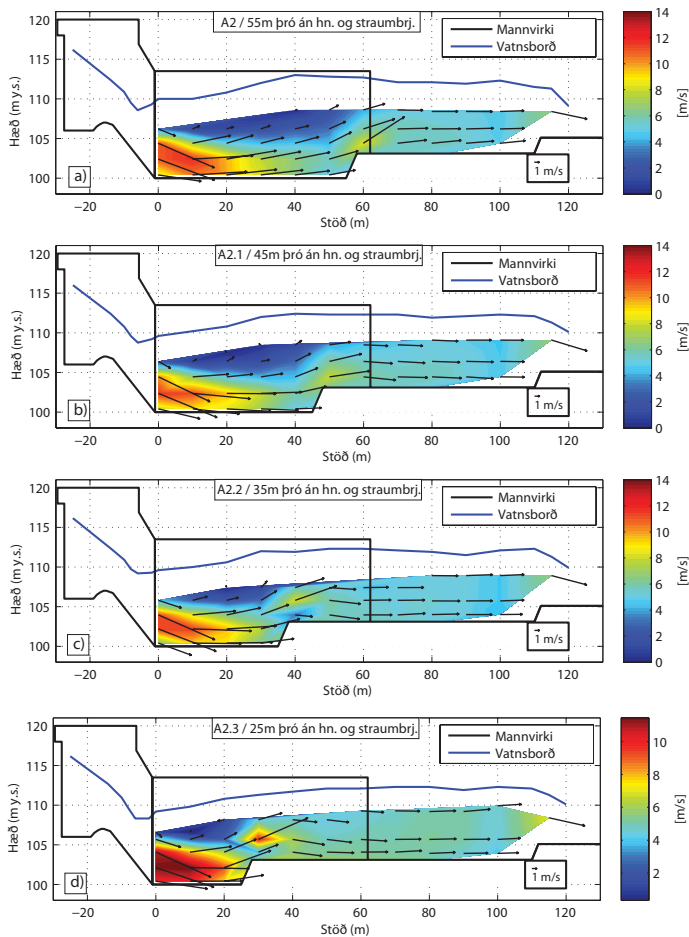
Tilfelli	$B_1$ (m)	Hnallar og straumbrjótar
A2	55	Nei
A2.1	45	Nei
A2.2	35	Nei
A2.3	25	Nei
A2.2BC	35	Já
A2.3BC	25	Já

## Niðurstöður

Mynd 6 sýnir dreifingu mælds meðalhraða í miðplani iðuþróarinnar fyrir fjórar þróarlengdir við 2150 m<sup>3</sup>/s mælt með ADV hljóðhraðamæli. Myndin sýnir að hraðadreifingin breytist frá því að vera með mestan hraða við botn efst í þrónni, sem eins konar buna inn í vatnsmassann í þrónni (e. *plane wall jet profile*), yfir í hefðbundið hraðasnið fyrir rennsli í opnum farvegi í skurðinum neðan iðuþróar. Þessi hegðun er eðlileg þar sem rennsli inn í þróna er orkurík buna sem hefur háan straumhraða, eða um 12- 15 m/s fyrir rennslin sem voru prófuð. Innan þróarinnar eyðist orka í straumstökki og hraði innan þversniðsins verður jafnari þegar fjær innrennsli er komið. Til að þróin skili hlutverki sínu er æskilegt að hraðadreifingin hafi náð jafnvægi þegar út úr þrónni er komið.

Fyrir 55 m langa þró hefur hraðavektor við enda þróarinnar lóðréttan þátt. Fyrir 45 m langa þró er lóðréttur þáttur hraða við enda þróarinnar þó mun minni. Hins vegar, fyrir tvær stystu þrærnar, 35 m og 25 m, er þessi lóðrétti hraðapáttur stærstur fyrir þau 4 tilfelli sem prófuð eru. Þetta gefur til kynna að orkurík buna sem rennur inn í þróna hafi ekki náð að dempast nægjanlega áður en hún kemur að endavegg og því virki endaveggurinn fyrir stystu þrærnar sem eins konar hnykkur á stefnu bununnar og vísi henni upp. Fyrir lengri þrærnar er þessi hraðapáttur mun minni. Fyrir 25 m og 35 m þró hefur straumhraði náð jafnvægi um 25 m neðan við endavegg en fyrir 45 m og 55 m þró næst jafnvægisástand fyrr, eða um 15 m neðan við endavegg. Álag á klöpp neðan við endavegg er því minna fyrir 45 m og 55 m þró. Séu gæði klappar góð ætti ekki að þurfa verja hana fyrir álaginu nema 10-15 m neðan við endavegg m.v. lengri þrærnar.

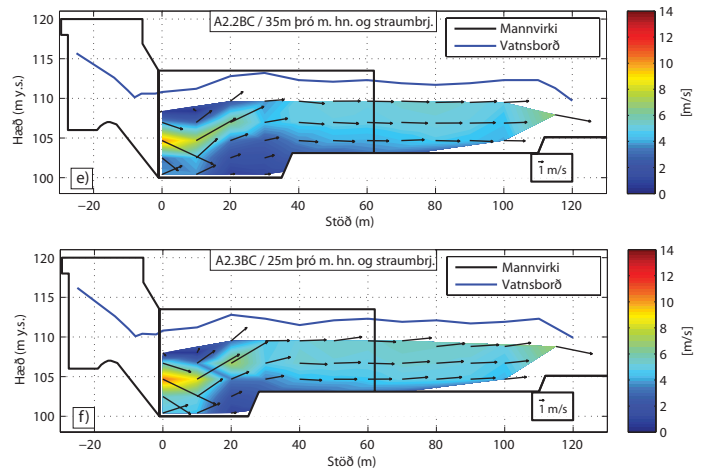




Mynd 6: Straumhraðadreifing í iðuþró án hnalla og straumbrjóta við 2150 m<sup>3</sup>/s. a) 55 m þró; b) 45 m þró; c) 35 m þró og d) 25 m þró. Litakvarði miðar við hæsta mælda gildi í hverju tilfelli fyrir sig og er ekki sá sami á öllum myndunum.

Mynd 7 sýnir straumhraðadreifingu fyrir tvö tilfelli iðuþróar þegar hnöllum og straumbrjótum er komið fyrir í þrónni, annars vegar 35 m þró og hins vegar 25 m þró. Myndin sýnir að hegðun rennslisins breytist töluvert frá mynd 6. Hnallarnir vísa vatnsmassanum sem kemur inn í þróna upp og yfir sig en kerfið nær jafnvægi mjög fljótt eftir hnallana sjálfa. Rennslið sýnir svipaða hegðun fyrir bæði bæði 25 m og 35 m þró með hnöllum og straumbrjótum. Helst má nefna að kerfið lítur úr fyrir að hafa náð jafnvægi við enda 35 m þróar en ekki fyrir 25 m þró. Með hnöllum og straumbrjótum hækkar vatnsborð í þrónni almennt, þó sérstaklega neðan við yfirfallskantinn og að hnöllumun sjálfum, þar sem vatnsborðið hækkar um 1-2 m (stöð -5). Þetta bendir til þess að hnallar og straumbrjótar hafi áhrif á innrennslið í þróna, þ.e. hækki vatnsborð með tilheyrandi lækkan á straumhraða og Froudetölu. Orku-eyðing í straumstökkkinu, sem hnallar og straumbrjótar þvinga fram, verður því minni.

Myndir 8 og 9 sýna samanburð á mældum hraðasveiflum (RMS)



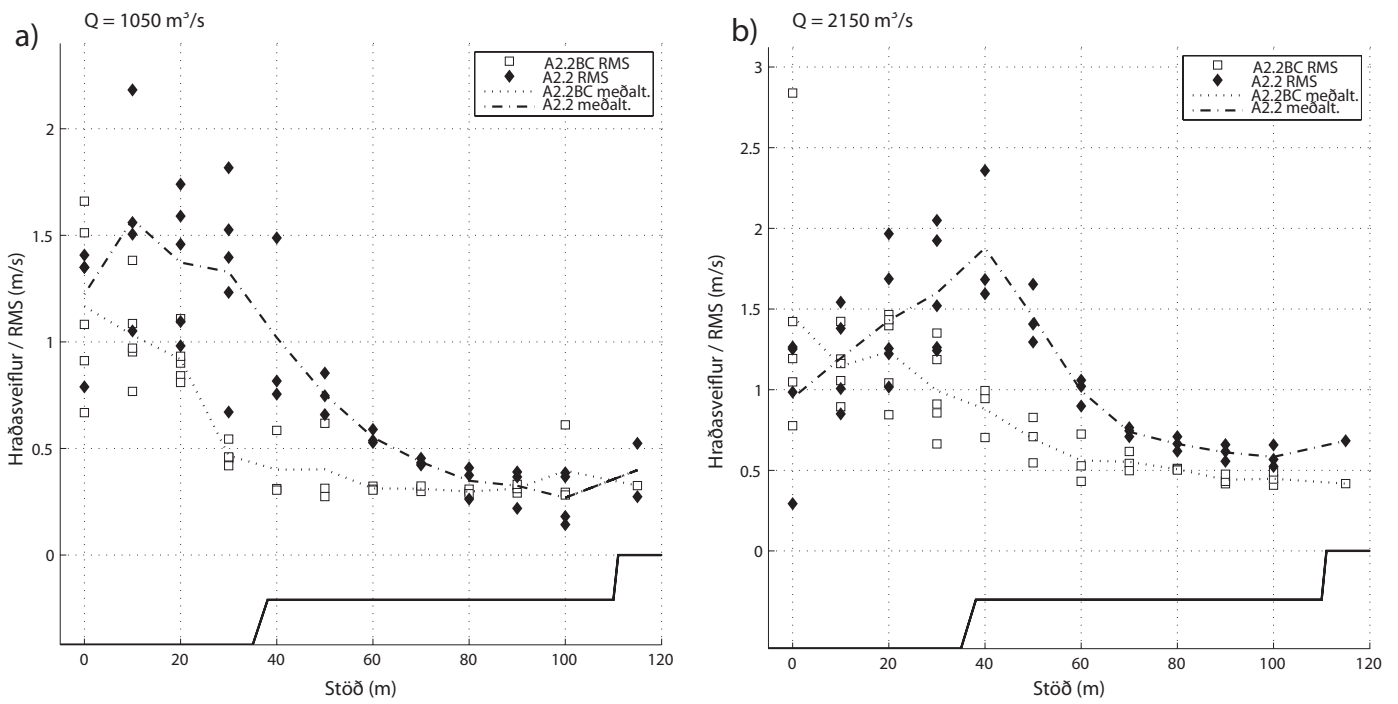
Mynd 7: Straumhraðadreifing í iðuþró fyrir kerfi með hnöllum og straumbrjótum við 2150 m<sup>3</sup>/s; e) 35 m þró með hnöllum og straumbrjótum; f) 25 m þró með hnöllum og straumbrjótum við 2150 m<sup>3</sup>/s.

fyrir 25 m og 35 m þró með og án hnalla og straumbrjóta fyrir tvö rennsli. Helst má sjá að meiri hraðasveiflur mælast almennt í kerfinu án hnalla og straumbrjóta. Þar sem hraðasveiflur eru einkennandi fyrir straumstökk og orku-eyðingu innan þeirra má draga þá ályktun að meiri orku sé eytt í kerfinu án hnalla og straumbrjóta. Þetta er engu síður erfitt að sannreyna þar sem orku er erfitt að mæla, sérstaklega í svo veikum og óstöðugum kerfum.

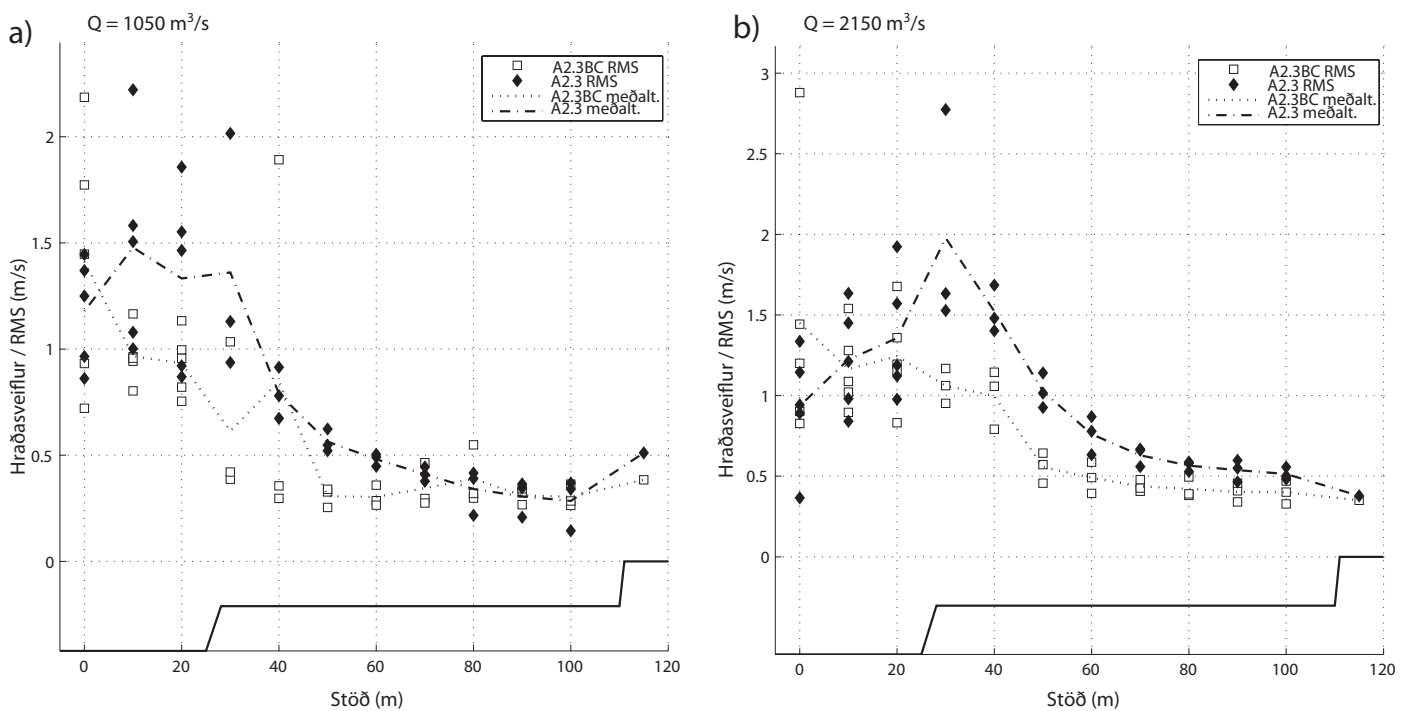
Mynd 10 sýnir, til samanburðar við hraðamælingar, staðalfrávik þrýstings. Þar eru bornar saman mælingar við tvö rennsli fyrir 25 m og 35 m þró með og án hnalla og straumbrjóta. Fyrir 1050 m<sup>3</sup>/s má segja að báðar þróarlengdir án hnalla og straumbrjóta hegði sér á svipaðan hátt. Há gildi mælast framarlega í þrónni en lækka svo ört en virðast ekki hafa náð jafnvægi við enda þróar, hvorki fyrir 25 m né 35 m þró. Fyrir þró með hnöllum og straumbrjótum mælast að sama skapi há gildi í staðalfrávik þrýstings framan við hnallana en aftan við hnallana (st. 20+) lækka gildin mjög hratt og ná jafnvægi. Fyrir 2150 m<sup>3</sup>/s hegða kerfin sér sambærilega og fyrir 1050 m<sup>3</sup>/s.

Eins og þekkt er fyrir lágur Froude tölur er erfitt að fá hreinar línur í greiningu á kerfunum. Mynd 11 sýnir myndrænan samanburð á þróarlengdunum fjórum fyrir hönnunarrennsli, með og án hnalla og straumbrjóta. Horft er inn í kerfið frá hlið og er 55 m þróin efst og 25 m þróin neðst. 45 m og 55 m þró hafa svipaða eiginleika, orkurík buna kemur inn í kerfið og dempast í þrónni. Sjá má stakar loftbólur stíga upp í síðustu 10-20 m þróarinnar en fyrir 25 m og 35 m þró hegða loftbólurnar sér líkar heilum loftmassa sem ferðast inn í kerfið og beint út. Þetta eru einkenni „sweep out“ ástands, en þá hefur iðuþróin ekki nægjanlega lengd eða dýpt til að dempa straumhraðana nógu mikið. Allt að 3 m ölduhæð er mæld í kerfinu fyrir hönnunarflóð fyrir öll tilfelli þróarlengdar. Ef litið er á mynd 11d og f sést að loftmassinn í vatninu sem kemur inn í þróna er töluvert ofar í þrónni og hefur meiri einkenni þess að vatnið „fljóti“ yfir hnallana og út úr þrónni.

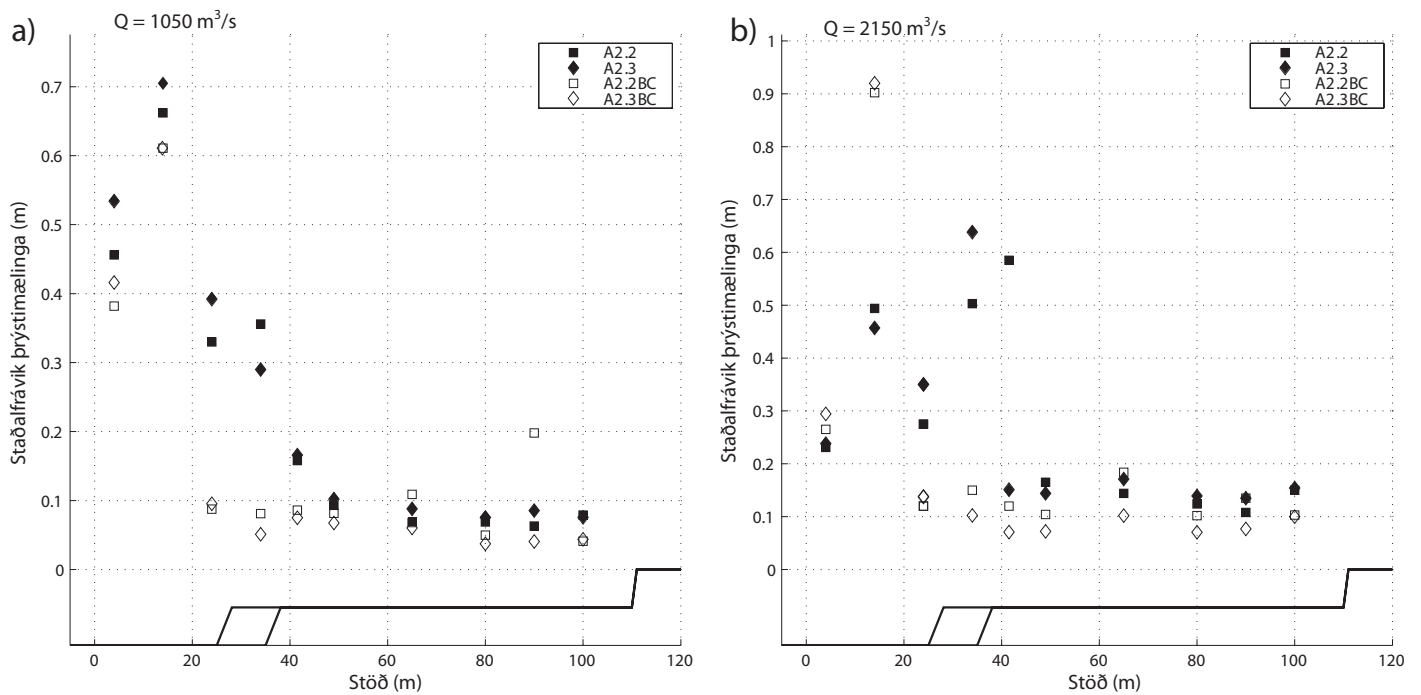




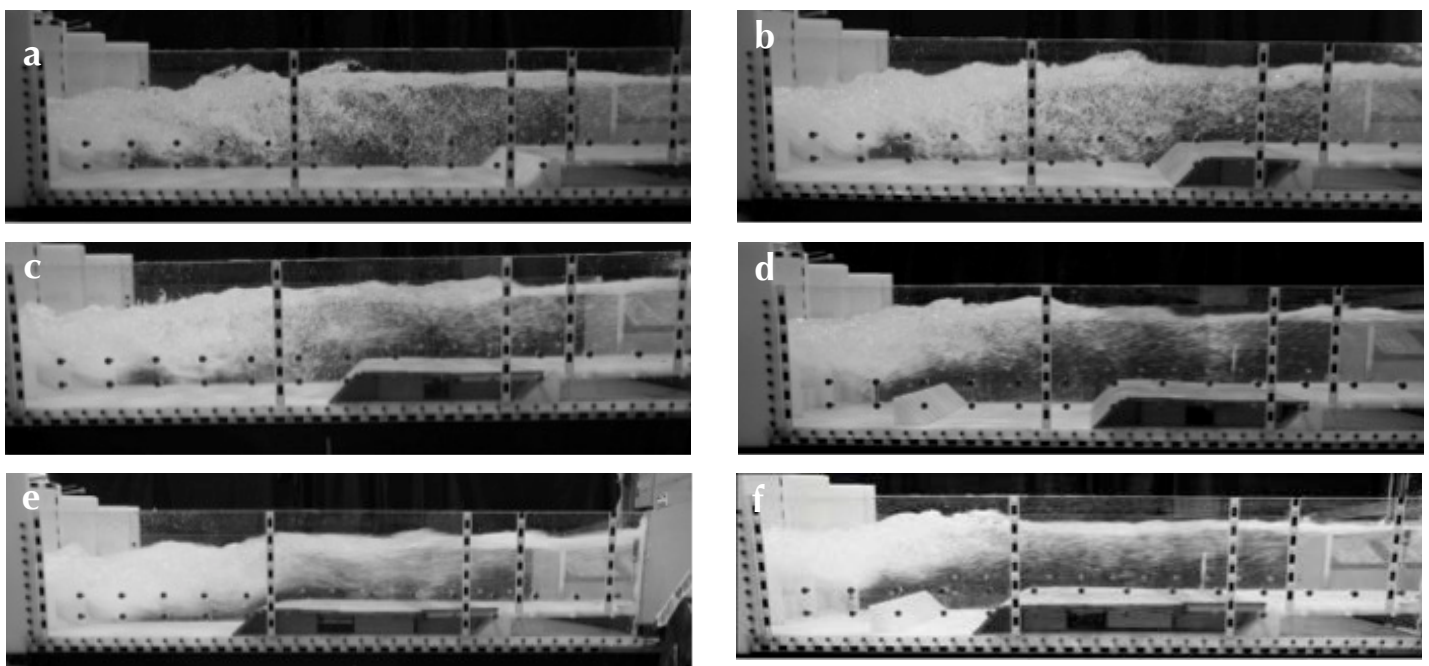
Mynd 8: Mæld RMS gildi hraða; a) 35 m þró með (A2.2BC) og án hnalla (A2.2) fyrir  $1050 \text{ m}^3/\text{s}$  og b) 35 m þró með (A2.2BC) og án hnalla (A2.2) fyrir  $2150 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Mynd 9: Mæld RMS gildi hraða; a) 25 m þró með (A2.3BC) og án hnalla (A2.3) fyrir  $1050 \text{ m}^3/\text{s}$ ; og b) 25 m þró með (A2.3BC) og án hnalla (A2.3) fyrir  $2150 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Mynd 10: Staðalfrávik þrýstings; a) 35 m og 25 m þró með (A2.2BC og A2.3BC) hnöllum og straumbrjótum og án hnalla og straumbrjóta (A2.2 og A2.3) fyrir 1050 m<sup>3</sup>/s og b) sama og í a) nema fyrir 2150 m<sup>3</sup>/s.



Mynd 11: Ljósmyndir af mismunandi þróarlengdum við hönnunarrennsli. a) 55 m löng þró án hn. og straumbrj. b) 45 m þró án hn. og straumbrj. c) 35 m þró án hn. og straumbrj. d) 35 m þró með hn. og straumbrj. e) 25 m þró án hn. og straumbrj. og f) 25 m þró með hn. og straumbrj. Í öllum tilfellum er rennslið 2150 m<sup>3</sup>/s.

**Samantekt**

Prófaðar voru mismunandi útfærslur iðuþróar fyrir fyrirhugaða Hvammsvirkjun í Neðri Þjórsá í straumfræðilíkani. Mæliniðurstöðurnar benda til þess að krítískur punktur í kerfinu sé þar sem endaveggur iðuþróar mætir sprengdum skurði. Með því að stytta iðuþróna mælast auknar sveiflur á þessum stað, bæði í hraða og þrýstingi. Fyrir 45 m og 55 m þró mælast ekki hágildi eða óeðlileg gildi við mót endaveggjar og sprengds skurðar, en fyrir 25 m og 35 m þróarlengd er önnur hegðun í kerfinu fyrir hönnunarflöð. Rétt neðan við endavegginn mælast miklar sveiflur í hraða og þrýstingi sem geta orsakað álag í fullgerðu mannvirki sem að lokum getur valdið rofi. Áhættan á slíku rofi dregur úr

öryggi mannvirkisins.

Mælingar benda til þess að 35 m þró sé nægjanlega löng til þess að hafa tök á því að eyða orku og dempa kerfið ásættanlega við 1050 m<sup>3</sup>/s en ekki við 2150 m<sup>3</sup>/s. Hins vegar hafi 45 m löng þró mun betri tök á því að dempa kerfið ásættanlega áður en rennslið skilar sér aftur út í farveg Þjórsár. Sé kerfið skoðað með hnöllum og straumbrjótum fyrir 25 m og 35 m þróarlengdir kemur í ljós að hegðum kerfisins er önnur. Hnallar virðast virka mjög vel til að dempa kerfið og litlar þrýsti- og hraðasveiflur mælast aftan við hnallana. Hins vegar má vænta að álag á hnalla og straumbrjóta sé töluvert og mælingar benda til þess að heilt yfir sé minni orku eytt með notkun þeirra.

Niðurstaðan er ekki augljós þar sem erfitt er að greina kerfið nákvæmlega. Þar með, ef lækka á byggingarkostnað mannvirkisins með því að stytta iðuþróna, þarf að meta gaumgæfilega gæði klappar neðan við iðuþró, í sprengdum skurði og við manngert stýrisnið þar sem hluta orkunnar er eytt í skurðinum og við stýrisniðið. Séu hnallar og straumbrjótar notaðir þarf að meta hversu mikið rekstrarkostnaður eykst til viðmiðunar við sparnað í þróarlengd.

Í framhaldi af þessari rannsókn væri áhugavert að prófa fleiri tilfelli með meiri breytileika í Froude tölu innrennslis til að átta sig betur á sambandi hennar við orkueyðslu og nauðsynlega lengd iðuþróar.

### Heimildaskrá

- Durbin, P. A., & Gorazd, M. (2007). *Fluid Dynamics with a Computational Perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.
- García, C. M., Cantero, M. I., Nino, Y., & García, M. H. (2005). Turbulent Measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1062-1073.
- García, C., Bombardelli, F., Buscaglia, G., Cantero, M., Rincón, L., Soga, C., et al. (2002). Turbulence in bubble plumes. *HMEM - ASCE*.
- George, R. (1978). *Low Froude Number Stilling Basin Design - REC-ERC-78-8*. Denver, CO: USBR.
- Gunnarsson, A. (2012). *Physical Model Investigation on the Hvammur HEP Spillway*, <http://hdl.handle.net/1946/10817>. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Gunnarsson, A., Gardarsson, S., Tomasson, G. G., & Johannesson, H. (2012). STILLING BASIN LENGTH OPTIMIZATION FOR HVAMMUR HYDRO ELECTRIC PROJECT. *Proceedings of the 2nd IAHR Europe Congress* (pp. 1-6). Munich: IAHR.
- Liu, M., Zhu, D. Z., & Rajaratnam, N. (2002). Evaluation of ADV Measurements in Bubbly Two-Phase Flows. *Proceedings of Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference 2002* (pp. 1061-1071). American Society of Civil Engineers.
- Murzyn, F., & Bélorgey, M. (2002). Turbulence structure in free surface channel flows. *HMEM - ASCE*, 220-233.
- Nikora, V. I., & Goring, D. G. (1998). ADV Measurements of Turbulence: Can We Improve Their Interpretation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 630-634.

Frekari útfærslur á lögun og notkun hnalla og straumbrjóta gæti aukið enn á virkni þeirra og gert þá að hagkvæmum kosti til orkueyðslu við lágur Froude tölu.

### Þakkir

Siglingastofnun Íslands er þakkað fyrir aðstoð við tilraunirnar. Hönnuðum mannvirkjana, Einari Júlíussyni hjá Mannvit, og Þorbergi Leifssyni hjá Verkís er þakkað samstarfið. Gísli Péturssyni er þökkúð aðstoð við byggingu líkansins og mælingar og Ágúst Guðmundsson fær einnig þakkir fyrir sitt innlegg.

- Pillai, N., Goel, A., & Dubey, A. K. (1989). Hydraulic Jump Type Stilling Basin for Low Froude Numbers. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No.7, Paper No. 23624.
- R. Ettema. (2000). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.97. Hydraulic Modeling: Concepts and Practice*. Chicago: ASCE Publications.
- Rutschmann, P., Sepp, A., Geiger, F., & Barbier, J. (2011, 7). Das Schachtkraftwerk - ein Wasserkraftkonzept in vollständiger Unterwasseranordnung. *Wasserwirtschaft*, pp. 33-36.
- Sontek. (1997). *Acoustic Doppler velocimeter technical documentation v.4.0*. San Diego, USA: Sontek/YSI Inc.
- Swart, D. (2000). Hydraulic Methods and Modeling. *Hydraulic Structures, Equipment and Water Data Acquisition Systems*, Vol 1, 4.
- Urban, A. L., Wilhelms, S. C., & Gulliver, J. S. (2005). Decay of Turbulence Downstream of a Stilling Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 825-829.
- USBR. (1987). *Design of Small Dams*. Denver, USA: United States Department of the Interior.
- Wahl, T. L. (2000). Analyzing ADV Data Using WinADV. *Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management* (pp. 1-10). Minneapolis: American Society of Civil Engineers.
- Wahl, T. L. (2011). *WinADV32 - Version 2.028*. Denver, Colorado 80225-0007, USA: Bureau of Reclamation, Hydraulic Investigations and Laboratory Service Group.



# Bluebeam® Revu® 11

**Bluebeam Revu 11 leggur línurnar fyrir samvinnu, samskipti og skjalavinnslu með PDF skjöl. Auðveldar þér að nálgast gögnin þín á einfaldan hátt hvar sem er og hvenær sem er... Jafnvel án nettengingu. Athugasemdir, magntökur og samræmingar á PDF skjölum er komið á annað stig. Kynntu þér Bluebeam hjá Snertli.**

*Bluebeam eru engin takmörk sett*