

# ÞJÓRSÁRÍSAM OG ÍSAVERKFRÆÐI

Sigmundur Freysteinnsson  
*Verkfræðistofu Sigurðar Thoroddsen*  
*Ármúla 4, 108 Reykjavík*

Upphaf ísafræða sem sérgreinar í verkfræði er að rekja til vandamála, einkum í sambandi við rafstöðvar. Snemma komu út bækur um þessi efni, t.d. eftir G. Lüscher í Sviss 1906 [7] og H. T. Barnes í Kanada 1928 [2]. Á Norðurlöndum hafa víða verið mikil og margvísleg ísvandamál við virkjanir og hafa margir fræðimenn lagt hönd á plóginn í rannsóknum þar að lútandi. Einna kunnastur þeirra var norðmaðurinn dr. Olaf Devik. Doktorsritgerð hans frá 1931 [4] var tímamótaverk í ísafræðum og löngum til hennar vitnað.

Á síðari árum hefur mikið verið lagt í ísarannsóknir á norðurhveli jarðar í sambandi við olíuvinnslu í norðurhöfum og lengingu siglingatímans á sjó sem og á fljótum og skipaskurðum. Rit um ísaverkfræði eru smám saman orðin mikil að vöxtum, en af yfirlitsverkum má til dæmis nefna bækur eftir Michel [8] og Sanderson [9] og safnrítið "River and Lake Ice Engineering" [1].

Ístruflanir við rafstöðvar eru tíðar hér á landi, sérstaklega þar sem inntaks- eða miðlunarlon eru lítil. Samantekt um þessa hluti eftir Hauk S. Tómasson jarðfræðing birtist í Tímariti VFÍ 1959 [6]. Þar kemur glöggt fram nán fylgni milli truflana og endingartíma inntakslóns. Vandamálin héraendis voru þó ekki stórbrotin og lítið í frásögur færandi þar til kom að virkjun Þjórsár, þá voru þau orðin á heimsmælikvarða. Þetta var mörgum ljóst því að allengi hafði verið fylgst með Þjórsárisum.

Frá upphafi voru mælingar á ís eitt af mörgum verkefnum vatnamælinga raforkumálastjórnarinnar. Aðstæður voru þó ekki til kerfisbundinna rannsókna, gagnasöfnun var gloppótt framan af og tölulegar upplýsingar af skornum skammti. Eigi

að síður tókst að draga saman mikla vitneskju um ísalög íslenzkra vatna og var þetta að hluta til birt í skýrslum og skilagreinum vatnamælinga raforkumálastjóra. Sem dæmi má nefna almennt yfirlit um ísalög frá 1959 [12]. Ítarlegri samantektir hafa síðan birt í tímaritum og bókum t.d. greinar Sigurjóns Rists um Þjórsárís í Jökli 1962 [13] og í riti frá ísaráðstefnu IAHR í Reykjavík 1970 [14], um Mývatnsísa 1969 [15] og um ísa Þingvallavatns 1986 [16].

Grein Sigurjóns í Jökli 1962 er heildaryfirlit um ísalög á vatnasviði Þjórsár og reyndar eru þar einnig upplýsingar um Hvítá og Ytri Rangá. Í stórum dráttum voru ísalög á öllu þessu svæði orðin vel þekkt þegar hér var komið sögu og má það kallast góður árangur miðað við efni og aðstæður. En eins og fyrr segir, þá voru mælingar og tölulegar upplýsingar takmarkaðar.

Til að forðast aurburð og ísvandamál við vatnsaflsvirkjanir er æskilegt að beizla árnar ofanfrá og byrja með virkjun úr djúpu inntakslóni. Önnur sjónarmið geta þó ráðið meiru og þá einkum stofnkostnaður. Þannig varð Búrfellsvirkjun fyrir valinu sem fyrsta virkjun á Þjórsársvæðinu, enda þótt fullkunnugt væri um gríðarlega ísmyndun í hinni löngu straum- og lindavök ofan við virkjunarstaðinn og ekki um inntakslón að ræða sem gæti tekið við öllum ísnum. Skiptar skoðanir voru um rekstrar-möguleika virkjunarinnar en hinir erlendu hönnuðir (Harza Engineering Company International) og fleiri sem hlut áttu að máli voru bjartsýnir. Það var þó ljóst að frekari athuganir á ísalögum og rannsóknir væru nauðsynlegar fyrir hönnun og rekstur.

Sérstök gagnasöfnun vegna ísarannsóknna á þessum slóðum hófst í febrúar 1963 [5]. Á næstu árum urðu athuganir allumfangsmiklar og tengdust fræðilegum rannsóknum og þróun mælitækja. Sameinuðu þjóðirnar veittu styrk til rannsókna og áætlanagerðar á vatnasviðum Þjórsár og Hvítár 1964-66, m.a. til ísarannsóknna. Tveir norskir ísá sérfræðingar, dr. Olaf Devik, sem áður er getið, og Edvigs V. Kanavin voru hér langdvölum á vegum S.Þ. og ýmis mælibúnaður var keyptur fyrir þennan styrk. Upphaflega voru athuganir á vegum raforkumálastjóra og Orkustofnunar, en eftir að Landsvirkjun tók til starfa og hóf rekstur virkjana færðust ísathuganir á Þjórsársvæðinu að mestu á hendur þeirrar stofnunar.



MYND 1. Dr. Olaf Devik við Tangavað 25. mars 1965.

Niðurstöður athugana og rannsókna hafa verið birtar í fjölrítuðum skýrslum og víðar. Þetta er orðið mikið að vöxtum, t.d. er vísað í 67 heimildir í yfirlitsskýrslu um athuganir fram til 1971 [10]. Eftir viðfangsefnum má skipta rannsóknum í nokkra flokka og skal hér vikið að hverjum þeirra um sig.

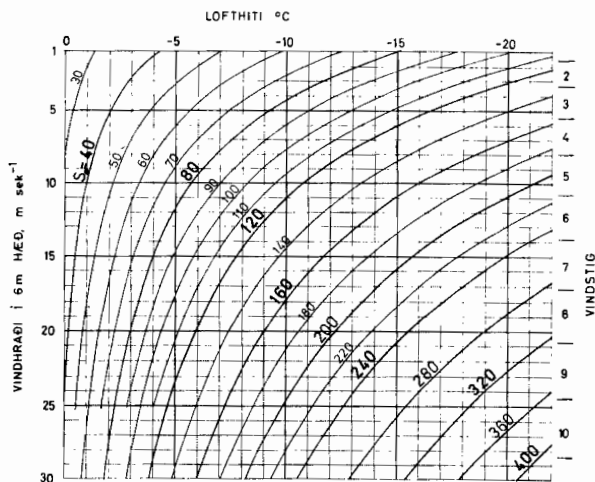
*Veðurathuganir.* Veðurathuganir eru vitaskuld grundvallarrannsóknir í þessu sambandi, því að veðrið framleiðir ísinn. Veðurathuganir voru gerðar um lengri og skemmri tíma á vatnasviðinu ofan Búrfells á árunum 1964-68. Athugunarstöðvar voru við Tangafoss, Búrfell, Hrauneyjafoss, Svartá á móts við Norðlingaöldu og í Þóristungum. Yfir-

leitt náðu mælingar aðeins til lofthita, vindhraða og vindáttar, nema við Tangafoss, þar sem mönnuð stöð var í tvo vetur. Helztu niðurstöður af þessum athugunum voru eftirfarandi: Til að áætla þá þætti veðursins sem mestu máli skipta fyrir varmatap og ísmyndun á vatnasviði Efri Þjórsár má notast við athuganir í byggð. Hitafall með hæð er mjög mikið á vatnasviði Þjórsár og meðalhiti ársins (miðað við 1931-60) er neðan við frostmark þegar kemur upp fyrir um 550 m y.s. Norðaustanátt er langalgengust á svæðinu og vindhraði til jafnaðar mjög mikill eða svipaður og á Hveravöllum.

*Athuganir á Ísalögum.* Ísalög voru athuguð, bæði af vetursetumönnum við Búrfell, Tangafoss og víðar, og í mörgum flugferðum. Eldri lýsingar Sigurjóns Rist voru staðfestar í megindráttum, en fyllt upp í myndina í ýmsum smærri atriðum. Helzta einkenni á ísalögum á efra Þjórsársvæðinu var mikil straum- og lindavök upp Þjórsá frá Búrfelli að Tangafossi og áfram upp Tungná og Köldukvísl. Ísskrið sem myndaðist í þessari vök var mesta vandamálið við Búrfellsvirkjun. Þess vegna var lögð áherzla á að kanna stærð vakarinnar við mismunandi aðstæður. Eftir athugunum í flugferðum 1964-67 voru vakir færðar inn á kort í mælikvarða 1:20.000 og flatarmál opins vatns mælt. Að lokum tókst að finna aðferð til að reikna stærðarbreytingar vakarinnar eftir varmatapi, rennslí Þjórsár og stærð vakarinnar sjálfrar.

*Vatnshiti og varmatap.* Athuganir á vatnshita í ánum sýndu, að vatnshitinn breytist mjög hratt með lofthita, eins og við er að búast í grunnu, straumhörðu vatni á vindasömum slóðum. Þannig er vatnshitinn oft kominn í 0°C um leið og lofthitinn. Mælingar á varmatapi frá opnu vatni voru prófaðar með ýmsum aðferðum. Bestur árangur náðist með beinum mælingum á varmatapi frá lítilli á, Korpu í Mosfellssveit. Eftir mælingunum voru valdar formúlur til að reikna varmatapið eftir venjulegum veðurathugunum. Á 2. mynd er línurit yfir varmatap frá 0° vatnsfleti. Það kemur glögg fram hversu mikil áhrif vindhraðans eru.

*Útreikningar á ísmyndun.* Við rennslisvirkjanir eins og Búrfellsvirkjun eru ekki tók á að láta ís-



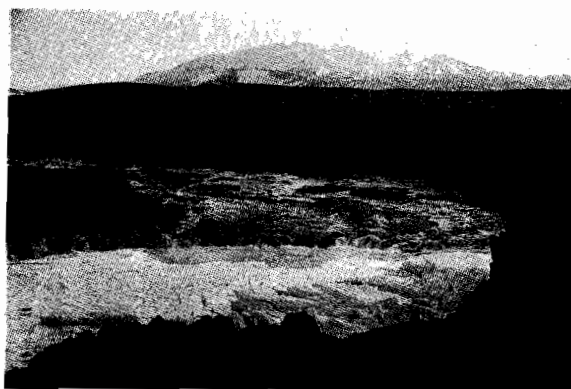
MYND 2. Varmatap frá  $0^\circ$  vatnsfleti,  $S_0$  Mcal  $\text{km}^{-2} \text{s}^{-1}$  í heiðskíru án sólgeislunar. Sólgeislun er hverfandi lítil á Þjórsársvæðinu frá nóvemberbyrjun fram undir miðjan febrúar. Skýjahula dregur úr varmatapinu, mest um  $15\text{-}20 \text{ Mcal km}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Við varmatap  $80 \text{ Mcal km}^{-2} \text{s}^{-1}$  myndast 1 tonn af ís á sekúndu á hverjum ferkílómetra.

skrið safnast saman ofan við stíflu eða inntak og verður þá að nota hluta af vatninu til að skola því framhjá. Hér var um umtalsvert vatnsmagn að ræða, því að ísmagnið var til jafnaðar um 30 milljón tonn á vetri og skolvatnið fimmtán til tuttugufalt meira eða 450 til 600 GJ. Á slíkum virkjunarstöðum er þýðingarmikið að geta reiknað út ísmyndun yfir nokkurra ára tímabil vegna spádóma um orkuvinnslu. Útreikningar á ísmagni geta einnig komið að notum við rekstur veituvirkja, áætlanir um nauðsynlega stærð lóna þar sem safna skal ís, o.fl. Slíkir reikningar voru gerðir á ísmyndun í vökinni ofan Búrfells. Byggt var á dagsmeðaltölum veðurathugana og reiknuðum breytingum á stærð vakarinnar. Mælingar á hinni gríðarmiklu íshrönn neðan Búrfells staðfestu að reikningarnir væru af rétttri stærðargráðu. Rúmtak hrannarinnar var mælt eftir loftmyndum sem teknar voru 23. febrúar og 27. marz 1965. Á þessu tímabili jókst

rúmtakið um 16,4 milljónir rúmmetra, og gerðist það að langmestu leyti dagana 18. til 27. marz. Útreiknuð ísmyndun þessa daga var 7,7 milljónir tonna og með þeirri rúmþyngd sem mældist í hrönninni ( $0,5\text{-}0,6 \text{ t/m}^3$ ), og með tilliti til þess að einhverjar vatnsuppistöður voru í hrönninni o.fl., er samræmi milli útreikninga og mælinga viðunandi. Beinar mælingar á ísskriði voru síðar gerðar í Þjórsá við Sandafell nokkrum sinnum í febrúar-apríl 1969. Samsvörun milli útreikninga og mælinga var þá einnig allgóð.



MYND 3. Þjófafoss 15. febrúar 1965.



MYND 4. Þjófafoss 25. mars 1965. Hrönnin er að færa fossinn í kaf.

Þróun mælitækja. Mælingar á ísskriði 1969 voru gerðar með elgmæli, tæki sem Rafagnatækni hannaði [3]. Allmikil vinna var við að þróa not-

hæfan búnað, fyrst á vegum raforkumálastjóra og síðar í mælistöð Landsvirkjunar við Sandafell. Ísþykktarmælar, þrepahlaupaskynjarar o.fl. tæki voru hönnuð af Rafagnatækni vegna Búrfellsvirkjunar. Tækin voru ætluð fyrir rekstur virkjunarinnar, en munu aðeins hafa verið notuð um skamma hríð.

*Hönnun mannvirkja.* Við hönnun vatnsaflsvirkjana er margs að gæta varðandi ís. Álag á mannvirki vegna íss er með ýmsu móti, t.d. þrýstingur lagnaríss vegna hitaþenslu, þrýstingur frá íshrönnum, högg frá ísjökum í straumvatni, lyftikraftar ís við vatnsborðsbreytingar og álag á inntaksristar sem stíflast af grunnstingli. Hér á landi hefur verið stuðzt við erlenda reynslu og staðla um þessa hluti. Í sumum tilvikum hefur álag verið vanmetið, en vafalaust sums staðar einnig ofmetið. Álag frá ís er erfitt viðureignar eins og gefur að skilja um efni sem er rétt við bræðslumark. Samband álags og formbreytinga er mjög flókið, en þessir hlutir eru nú teknir að skýrast eftir umfangsmiklar rannsóknir víða um heim á síðari árum. - Löng reynsla er af því, að nota má líkön til að rannsaka myndun ísþekju og hranna, bæði úr krapu og jökum. Þetta hefur verið gert við hönnun virkjana í Þjórsá og Tungná. Í straumfræðistöð í Þrándheimi (Vassdrags- og havnelaboratoriet ved NTH) voru gerðar prófanir á ísskolunarmannvirkjum við Búrfell, yfirfalli og frárennsli Sigölduvirkjunar og aðrennsli Hrauneyjafossvirkjunar. Yfirfall og hrannamyndun í Sultartangalóni var prófað í straumfræðistöð Orkustofnunar í Keldnaholti.

\*\*\*\*\*

Eftir tilkomu virkjana og miðlunarvirkja hafa orðið geysimiklar breytingar á ísalögum [11]. Með Búrfellsvirkjun 1969 var ísskriði ofanfrá veitt um skurð í Bjarnarlæk og safnaðist þessi ís að mestu saman neðan Búrfells sem fyrr. Samt sem áður varð Búrfellshrönnin ekki nema svipur hjá sjón, því að stórt og mikið ísmyndunarsvæði, frá veitustíflunni neðan Klofaeyjar og niður fyrir Búrfell, var nú úr sögunni. - Rekstur Búrfellsvirkjunar gekk vonum framar, en mikla aðgát þurfti við ísskolun,

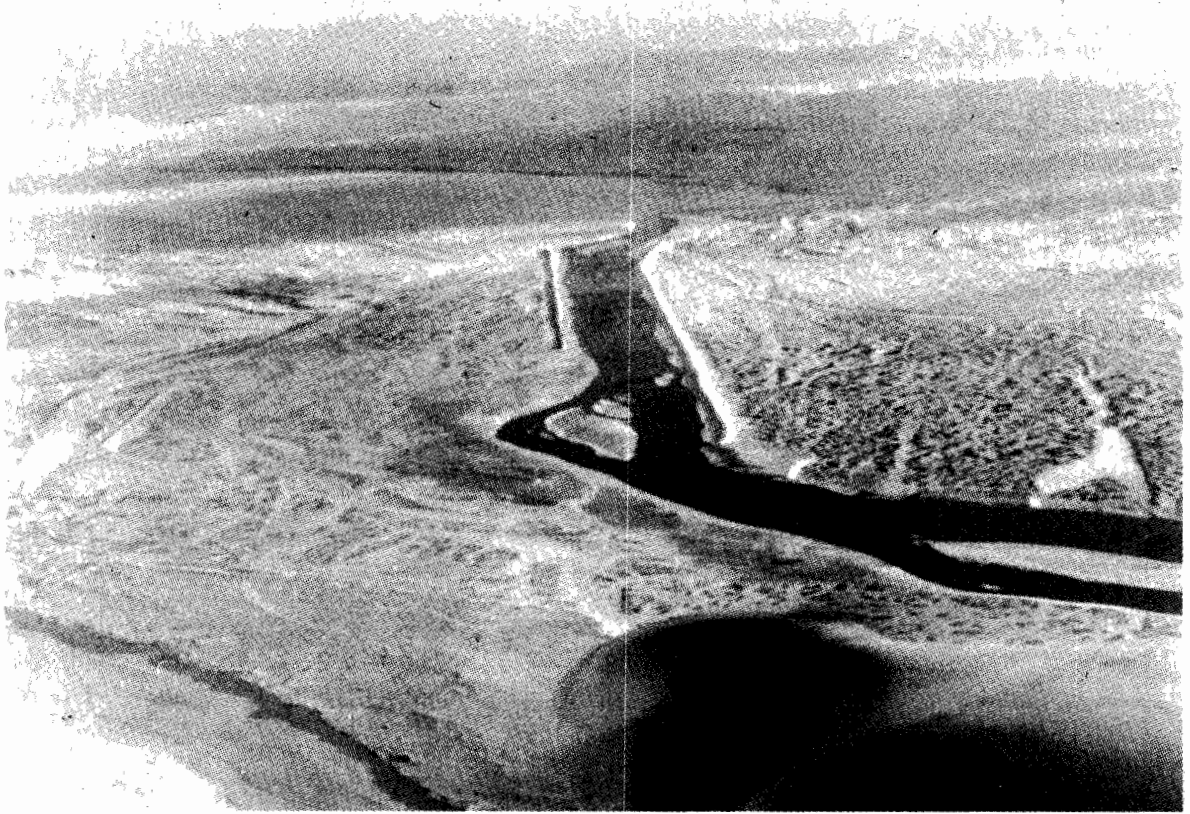
einkum vegna þrepahlaupa og annarra skyndilegra breytinga. Einstöku sinnum brást ísskolunin og geysimikil hrönn myndaðist ofan veitustíflunnar og upp fyrir Klofaey. Að öðru leyti voru áhrif virkjunarinnar á ísalög árinna mjög lítil.

Þórisvatnsmiðlun var tekin í notkun 1971-72 og jókst þá vetrarrennsli að sjálfsögðu mikið og opinn vatnsflötur í Tungná og Þjórsá í frostum hefur vafalaust til jafnaðar orðið stærri en áður. Hins vegar varð Kaldakvísl nú tiltölulega meinlaus lindá á veturna. Þar hafði áður verið mikil ísmyndun, og reyndar mun meiri en í Tungná ofan ármótanna. Virkjanir við Sigöldu (1977) og Hrauneyjafoss (1981) höfðu lítil áhrif á ísalög og ísmyndun við Búrfellsvirkjun, en miðlun og stjórn á rennsli Tungnár var að sjálfsögðu til bóta fyrir rekstur.

Ýmislegt var gert til að draga úr ísmyndun ofan Búrfells, með því að lagfæra farvegi og minnka vatnsflöt: Byggðir voru garðar við veitustíflu og austan við Klofaey (1970-71 og 1974); þegar Þjórsá var brúuð við Sandafell (1975) var stíflað fyrir ála við Efri Klofaey; Tungná við Sultartanga var veitt í einn farveg (1975) (5. mynd); virkur vatnsflötur Þjórsár ofan við Klofaey var minnkaður um helming með garði eftir miðri ánni (1979).

Þetta hafði allt áhrif til að minnka ísmyndun og draga úr þrepahlaupum, en samt sem áður mátti mikið gera til að bæta öryggi og hagkvæmni í rekstri Búrfellsvirkjunar, og var Sultartangastífla (1983) næsta skref í þá átt. Við stífluna er 18 km<sup>2</sup> lón, um 75 Gl að rúmtaki, og verður það inntakslón fyrir væntanlega virkjun á fallinu milli Sultartanga og Búrfells. Lónið leggur fljótt með krapu frá Þjórsá og Tungná og hefur vatnshiti í útrennslinu verið 0,1 til 0,3°C eftir að það leggur.

Vatnsflötur frá Sultartanga að veitustíflu Búrfellsvirkjunar er nú venjulega 1,5 til 2 km<sup>2</sup>, en það er nógu mikið til að vatnið verði undirkaelt á þessari leið þegar varmatap er verulegt. Undirkaeling er mest rétt eftir að hitinn fellur niður fyrir frostmark, þá lækkar hiti raunar ætíð furðulega mikið áður en kristalmyndun byrjar, og svo mun raunar vera um alla vökva áður en þeir kristallast við kólnun. Vegna þessa verður grunnstingulmyndun neðan Sultartanga nú oft mjög mikil og mun meiri



MYND 5. Tungná við Sultartanga 26. jan. 1980. Stíflur í kvíslum og garðar meðfram ánni. Þjórsá neðst t.v., að mestu lögð.

en upphaflega. Krap og ísskolun er ekki úr sögunni, en það er þó lítið miðað við það sem áður var, þegar vatnsflötur var 5-10 km<sup>2</sup>.

Við Sigölduvirkjun hafa ekki verið nein ísvandamál hingað til. Lónið þar, Krókslón, er 14 km<sup>2</sup> og tiltölulega djúpt; meðaldýpt um 13 m. Lónið leggur venjulega snemma og hefur vatnshiti verið 0,1 til 0,4°C eftir að það leggur. Vatnshitinn gæti þó farið langt niður ef of miklu væri veitt úr Þórisvatni þegar vatnið þar er 0°C eða þaðan af kaldara. Þórisvatn er mjög stórt og djúpt og gengur oft mikið á í norðaustan illviðrum áður en það leggur. Vatnið getur þá kólnað niður í 0,1 til 0,2°C allt niður á 100 m dýpi, en nær yfirborði verður undirkæling og

krapamyndun. Sérkennilegar myndanir hrúgast stundum upp úr krapinu við ströndina, svokallaðir ísgígar, og gjósa vatni og krapu.

Hið "hlýja" vatn frá Sigölduvirkjun fellur beint í Hrauneyjalón, inntakslón Hrauneyjafossvirkjunar. Þetta lón er 8,8 km<sup>2</sup>, en meðaldýpt aðeins 4 m. Það kólnar því fljótt og illa í miklum áhlaupum á haustin og hefur undirkæling valdið vandræðum við inntak virkjunarinnar. Ef kuldinn stendur stutt, þannig að íspekja nær ekki sæmilegri þykkt, getur hún étist af vegna hlýja vatnsins frá Sigöldu og vandræðin endurtekið sig í næsta áhlaupi.

Þrátt fyrir ýmsar upptökur, þá hefur reynslan sýnt að hönnun virkjana á Þjórsársvæðinu hefur að

mestu verið viðunandi hvað snertir ísvandamál. Vissulega má margt læra af reynslunni, og kemur það vonandi til skila við virkjanir framtíðar. Frá ísaverkfræðilegu sjónarmiði hefðu meiri mælingar og athuganir eftir virkjanaframkvæmdir verið æskilegar, m.a. á varmajöfnuði og ísálagi. Vafalaust verða slíkar rannsóknir teknar á dagskrá fyrir eða síðar.

#### HEIMILDIR

- [1] Ashton, Georg, D. (Ed.) 1986: *River and Lake Ice Engineering*. Water Resources Publications, Colorado.
- [2] Barnes, Howard T. 1928: *Ice Engineering*. Renouf Publishing Co., Montreal.
- [3] Björn Kristinsson 1970: Ice Monitoring Equipment. *I.A.H.R. Symposium - Ice and its Actions on Hydraulic Structures*. Reykjavík.
- [4] Devik, Olaf 1931: Thermische und dynamische Bedingungen der Eisbildung in Wasserläufen auf Norwegische Verhältnisse angewandt. *Geofysiske publikasjoner* vol. IX. No. 1, Oslo.
- [5] Gunnar Sigurðsson 1964: Ísathuganir við Búrfell, febr.-apríl 1963. Raforkumálstjóri.
- [6] Haukur S. Tómasson 1959: Ístruflanir við rafstöðvar. *Tímarit VFÍ* 1959.
- [7] Lüscher, G. 1906: *Das Grundeis und daherige Störungen in Wasserläufen und Wasserwerken*. Druck und Verlag von Emil Wirz vormals J.J. Christen, Aarau.
- [8] Michel, Bernard 1978: *Ice Mechanics*. Les Presses de L'Université Laval, Québec.
- [9] Sanderson, T.J.O. 1988: *Ice Mechanics, Risks to Offshore Structures*. Graham & Trotman, London.
- [10] Sigmundur Freysteinnsson, Björn Erlendsson 1972: Yfirlit um ísaathuganir á efra Þjórsársvæðinu 1963-1971. Orkustofnun.
- [11] Sigmundur Freysteinnsson 1987: Hydropower in Cold Climates - Plant Planning - Experience from Iceland. *Workshop on Hydropower in Cold Climates*, NTH Trondheim.
- [12] Sigurjón Rist 1959: *Ísalög* - almennt yfirlit. Raforkumálaskrifstofan, vatnamælingar, skilagrein 180.
- [13] Sigurjón Rist 1962: Þjórsárísar. *Jökull* 12. ár.
- [14] Sigurjón Rist 1970: Ice Conditions in the Thjorsa River System, *I.A.H.R. Symposium - Ice and its Action on Hydraulic Structures*, Reykjavík.
- [15] Sigurjón Rist 1969: Mývatnsísar. *Hafísinn*, Almenna bókafélagið, Reykjavík.
- [16] Sigurjón Rist og Guðmann Ólafsson 1986: Ísar Þingvallavatns, *Náttúrufræðingurinn* 56. ár, 4. hefti.