

Tækniskóli Íslands

Rafiðnfræði
Haust 2000

Smávirkjanir

Arnar Pálsson
Kristinn Steinn Traustason

Hausti 00

SMÁVIRKJANIR

LOKAVERKEFNI RAFIÐNFRÆÐI HAUSTÖNN 2000

Höfundar:
Arnar Pálsson
Kristinn Steinn Traustason

Leiðbeinandi:
Magnús Mattíasson

Tækniskóli Íslands
30-11-2000

1 Efnisyfirlit

1 Efnisyfirlit	2
2 Formáli	4
3 Vatnsrennslis- og hæðamælingar	5
3.1 Tegundir áa	5
3.2 Rennslismælingar	6
3.2.1 Yfirfallsmæling	6
3.2.2 Flothylkismæling	9
3.2.3 Skrúfumæling	10
3.3 Hæðamælingar	11
3.3.1 Hæðamæling með GPS	12
3.3.2 Hæðamæling með hæðakíki	12
4 Uppbygging mannvirkja	13
4.1 Aðrennslispípur	13
4.1.1 Plastpípur	14
4.1.2 Járnpípur	15
4.1.3 Tap í pípum, ristum og beygjum	15
4.2 Uppbygging stíflumannvirkja	20
4.2.1 Stíflur	20
4.2.2 Botnlökur	20
4.2.3 Vatnsinntak	21
4.3 Uppbygging stöðvarhúss	23
5 Túrbínur	25
5.1 Slittæring (cavitation)	28
5.2 Pelton túrbína	28
5.3 Turgo túrbínur	29
5.4 Cross-flow túrbínur	30
5.5 Francis túrbínur	31
5.6 Kaplan og Propeller túrbínur	32
6 Rafalar	34
6.1 Samfasa rafalar	35
6.2 Ósamfasa rafalar	36

7	Tæknilegar upplýsingar	37
7.1	Samfösun	37
7.1.1	Framkvæmd samfösunar	38
7.2	Sjálvirk samfösun	39
7.3	Varnarbúnaður og leiðarar	40
7.3.1	Leiðarar frá rafstöð að tengivirki	40
7.3.2	Varnarbúnaður	43
7.3.3	Yfirálags- og skammhlaupsvarnir	43
7.4	Tenging við netið	46
7.4.1	Nefnd raforkubænda, RARIK og Löggildingarstofu	46
7.5	Hraðastýringar	49
7.5.1	Álagsstýring	49
7.5.2	Spennustýring	50
7.5.3	Gangráðar	51
7.5.4	Hraðastýring ósamfasa rafall	52
7.5.5	Svinghjólíð	52
7.6	Fjarstýringar	52
8	Kostnaðarútreikningar og fjármögnun	54
8.1	Kostnaðarútreikningar	54
8.2	Sundurliðun kostnaðar	55
8.3	Orkuverð	55
8.4	Verðhugmyndir	56
8.5	Fjármögnun	58
8.6	Arðsemisútreikningar	59
9	Reglur og reglugerðir	61
9.1	Orkulög	61
9.2	Lög um öryggi raforkuvirkja, neysluveitna og raffanga	62
9.3	Reglugerð um raforkuvirki	62
9.4	Orðsendingar Löggildingarstofu	64
9.5	Verklagsreglur Löggildingarstofu	64
9.6	Byggingareglugerð	65
9.7	Lög um mat á umhverfisáhrifum	65
10	Lokaorð	67
11	Heimildaskrá	68
12	Viðauki	71

2 Formáli

Virkjun bæjarlækjarins hefur runnið sem eldur um æðar bænda á Íslandi allt frá 1899, eða árið sem fyrstu rafljósini voru kveikt á Íslandi.

Umræða í samfélaginu um smávirkjanir, með sölu inn á dreifikerfið í huga, varð kveikjan að þessu verkefni.

Í þessu verkefni varpa höfundar mynd á þá möguleika sem felast í virkjun bæjarlækja. Hvaða þættir skipta máli þegar virkjunarframkvæmd er höfð í huga? Hvernig fara menn að við skipulagningu? Er þetta hagkvæmt? Hvert snúa menn sér við upplýsingaleit? Hvernig er hægt að gera þetta á sem ódýrasta máta? Menn sem hafa í hyggju að virkja velja þessum spurningum fyrir sér. Því er þörf á að teknar séu saman þær upplýsingar sem máli skipta við framkvæmd smávirkjana. Ætlunin er að verkefnið geti nýst sem handbók fyrir þá aðila sem hafa hug á að virkja.

Í verkefninu er fjallað um virkjanir af stærðinni 10 - 300kW með möguleika á tengingu við rafdreifikerfið. Verkefnið tekur á vatns- og hæðarmælingum, tæknilegum upplýsingum, kostnaði, fjármögnun, virkjunarframkvæmdum og lögum og reglugerðum sem þetta varða.

3 Vatnsrennslis- og hæðamælingar

Orka sem býr í vatnsfalli ákvarðast af þremur þáttum: vatnsrennslis, fallhæð og þyngdarkrafti jarðar. Formúla fyrir afl vatnsfalls er: $P = Q * H * g * \zeta$.

P er afl vatnsfalls í kW, Q er rennslis í m³/s, H er virk fallhæð í metrum, þ.e. heildarfallhæð mínus öll töp á fallhæðinni, g er þyngdarsvið jarðar sem er 9,81m/s² og ζ er eðlisþyngd vatns sem er um 1.

3.1 Tegundir áa

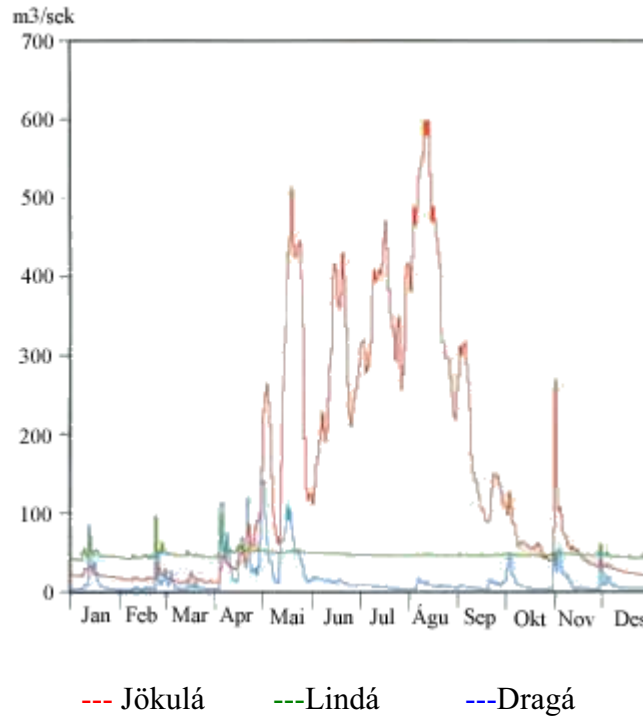
ár eru misjöfnar, allt eftir hvort þau eru lindár, dragár eða jökulár. Flestar minni ár eru annað hvort lindár eða dragár. Lindár eru nokkuð stöðugar ár sem breytast lítið á einu ári en þær geta þó breyst á nokkurra ára tímabili. Leysingar og úrkoma hafa ekki mikil áhrif á lindár. Dragár eru ár sem stjórnast mikið af leysingum og úrkomu og eru því mjög breytilegar frá degi til dags. Dragár eru mestar í vorleysingum en geta þornað upp í miklum þurrkum seinni part sumars og einnig í þurrum veðrum seinni part vetrar.

Aðstæður eru oft þannig að auðvelt er að jafna rennslis áa með vatnsmiðlunum úr öðrum lækjum eða ám.

Hitastig í ám er misjafnt. Í löngum dragám sveiflast hitastig meira með umhverfishitastigi en í stuttum lindám. Flúðir og fossar hafa einnig veruleg áhrif á hitasveiflur. Í mjög köldum ám myndast ísing og krapí sem skapar vandamál í virkjunum.

Áður en virkjað er verður að mæla rennslis í áni um nokkurt skeið. Ef Orkustofnun hefur framkvæmt rennslismælingar í nágrenninu er hægt að fá þær upplýsingar og bera saman við rennslis árinna. Á þann hátt er hægt að komast að hegðunarmynstri árinna.

Mynd 1 sýnir dæmi um mismunandi rennslis eftir tegundum áa.



Mynd 1. Jökulá, lindá, dragá

3.2 Rennslismælingar

Rennsli áa er grundvöllur fyrir virkjunarframkvæmdum og framkvæma verður vatnsmælingar um allnokkuð skeið, ár eða árabíl. Rennsli er sá lítrafjöldi vatns, sem rennur á hverri sekúndu um þverskurð farvegs. Hægt er að nota nokkrar aðferðir til að mæla rennsli áa í m³. Eftirfarandi aðferðir eru helst notaðar við litlar ár:

- 1) Yfirfallsmæling
- 2) Flothylkismæling
- 3) Skrúfumæling

3.2.1 Yfirfallsmæling

Yfirfallsmæling er mest notuð í smærri ám og er hlutfallslega mjög nákvæm. Hægt er að ná nákvæmni upp á 1-2% ef smíði og álestur eru framkvæmd á réttan máta.

Mæling með yfirfalli er hægt að framkvæma á ýmsa vegu, t.d. með V-sniði og U-sniði. Hvort um sig er hægt að framkvæma á mismunandi vegu. Yfirfallið er byggt í árfarvegi þar sem staðsetning vatnsinntaks er fyrirhuguð.

Yfirfallsmælingar eru notaðar í ám sem hafa mesta rennsli um $5\text{m}^3/\text{sek}$. U- og V-snið þurfa að hafa ákveðna lögun og stærð eftir því hversu mikið vatn er til umráða.

Tafla 1 sýnir hvernig hægt er að velja lögun og stærð yfirfalls fyrir rennsli undir $5\text{m}^3/\text{sek}$. Athuga ber þó að ef vatnsmagn er orðið yfir $2\text{m}^3/\text{sek}$ þá er yfirfallið orðið töluvert mannvirki. Þá er jafnvel orðið ódýrara að fá t.d. Orkustofnun til að framkvæma skrufumælingu.

Vatnsmagn sem ætlað er að mæla í l/sek.		Lögun yfirfalls	Hæð á skarði yfirfalls h í cm.		Dýpt á lóni í metrum.
min	max		min	max	ATH 2*H
1	140	Þríhyrningslaga horn 90°	5	40	0,85m
20	200	Rétthyrnt 0,3m breidd	10	40	0,8m
50	500	Rétthyrnt 1m breidd	10	40	0,8m
100	1000	Rétthyrnt 1-2m breidd	10	45	0,9m
100	1000	Rétthyrnt 1-2m breidd	15	65	1,3m
500	5000	Rétthyrnt 5-10m breidd	10	40	0,9m
500	5000	Rétthyrnt 5-10m breidd	15	65	1,3m

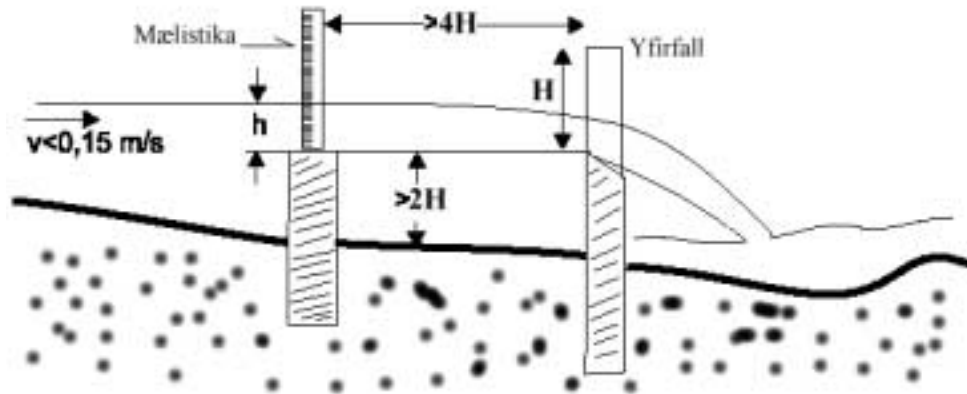
Tafla 1. Val á yfirfalli

Ef á tekur ekki miklum breytingum í hlaupum er ódýrast að byggja stíflu úr 2" borðum eða vatnsheldum krossviðarplötum, sem hvíla á traustum undirstöðum. Nauðsynlegt er að veita ánni frá á meðan verið er að byggja stífluna. Nauðsynlegt getur verið að þetta stífluna við botn svo að vatnið leki ekki undir hana. Það er hægt að gera með ýmsum hætti, t.d. með pokum fylltum af steypu eða sandi. Einnig er hægt að grafa plast eða dúk niður í jarðveginn og festa á neðstu borðin.

Möl sem berst í lónið verður að hreinsa burt svo hún trufla ekki mælinguna.

Á veturnum er nauðsynlegt að fylgjast vel með stíflunni og hreinsa allan ís sem kann að setjast á yfirfallsbrún. Vatnið verður að hafa ótruflaða framrás svo að mælingin sé sem réttust.

Mælikvarðinn skal staðsettur fyrir ofan yfirfallið, a.m.k 4x hæð á skarði yfirfalls. Þetta er gert til að brot vatnsins hafi ekki áhrif á mælinguna. Dýptin er lesin af mælistiku einu sinni til tvisvar á dag (eigi sjaldnar en tvisvar í viku), eða mæld stöðugt með sjálfvirkum mæli.

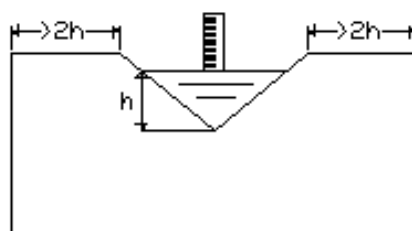


Mynd 2. Yfirfallsmæling þar sem H hæð á yfirfalli og h er hæð á vatnsborði

Fyrir V-laga yfirfall með 90° gildir eftirfarandi jafna:

Jafna fyrir rennsli í V-laga yfirfalli:

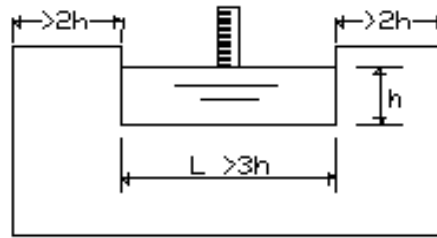
Jafna 1 $Q = 1,32 \times h^{2,47}$
 $Q =$ rennsli í m^3/sek
 $h =$ dýpt vatns yfir botn á yfirfalli í m.



Mynd 3. V-laga yfirfall

Jafna fyrir rennsli í U-laga yfirfalli:

Jafna 2 $Q = 1,84 \times (L - 0,2 \times h) \times h^{1,5}$
 $Q =$ rennsli í m^3/sek
 $h =$ dýpt vatns yfir skarði yfirfalls í m. (lágmark 6 cm)
 $L =$ lengd yfirfallskants í m.



Mynd 4. U-laga yfirfall

3.2.2 Flothylkismæling

Þessi mæling er aðeins nothæf að takmörkuðu leyti vegna ónákvæmni. Þó er hægt að nota þessa mælingu ef ekki á að fullnýta rennsli árinna. Mæling með flothylki er notuð sem bráðabirgðarmæling til að athuga rennsli árinna, áður en valin er stærð á yfirfalli.

Mælingin er nothæf fyrir á sem hefur jafna dýpt og breidd á 10 m. löngum kafla.

Framkvæmdin er einföld. Fundinn er staður í ánni þar sem dýpt og breidd árinna er nokkuð jöfn. Komið er fyrir markstöngum á báðum árbökkum, efst og neðst á mælingastað. Þess ber að gæta að stangirnar standi lóðrétt og séu þvert á snið árinna.

Flotholt er sett út í ána sem næst miðjum straum, 3-5 metra fyrir ofan efri markstangir. Tíminn sem tekur flothylkið að renna milli markstanganna er mældur. Með þessu finnst hraði sem er líkur yfirborðshraða straumsins. Almenn er litið svo á að meðalhraði vatns sé um 75% af yfirborðshraða en þetta á aðeins við ef vindur hefur ekki mikil áhrif á flothylkið. Þegar mæling er framkvæmd skal alltaf nota beinan hluta árinna.

Til að finna meðaldýpt árinna er best að leggja planku eða strengja línu yfir ána og merkja með jöfnu millibili. Dýpt árinna er mæld með mælistöng við hverja merkingu. Mælingarnar eru lagðar saman og deilt í með fjölda merkinganna.

Til að finna vatnsrennslið gildir eftirfarandi jafna 3.

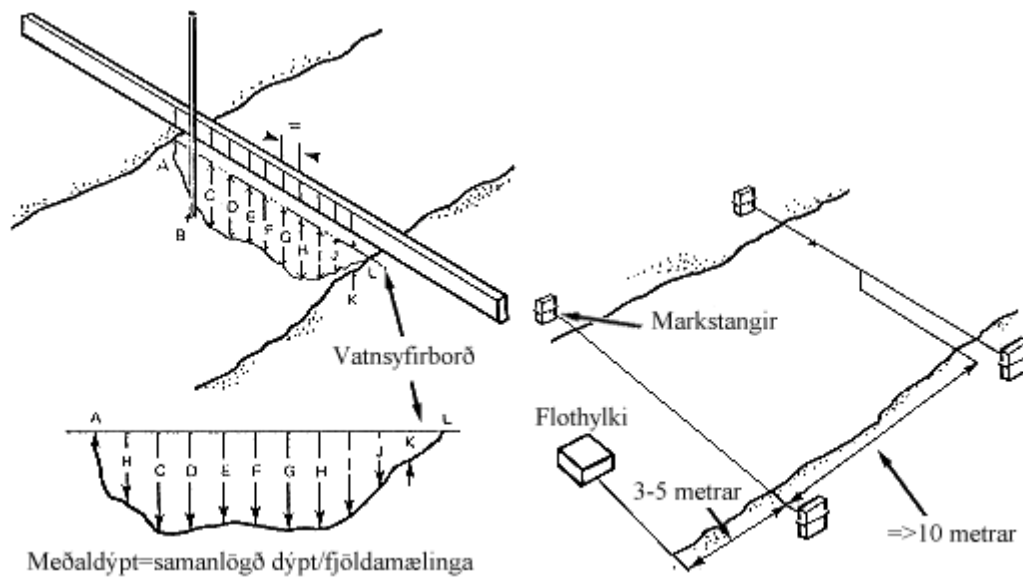
Jafna 3

$$Q = A * V$$

A= Meðaldýpt í m²

V=Renslishraði í m/sek

Q=Vatnsrennsli í m³/sek

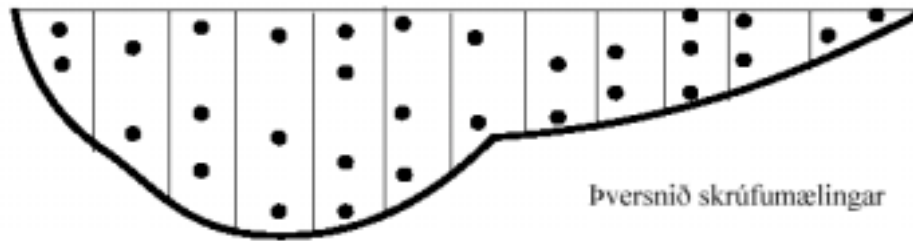


Mynd 5. Mæling með flothylki

3.2.3 Skrúfumæling

Mæling með skrúfu er nákvæm en erfið í framkvæmd. Búnaðurinn sem er notaður er nokkuð dýr. Notaður er skrúfumælir sem mælir strauminn í þversniði árinna. Með þessari mælingu er fundinn svokallaður rennslislykill árinna. Hverju mælisviði er síðan skipt í mismunandi dýpi eða mælistaði því mikill munur er á rennslishraða við bakka, botn eða í miðbiki árinna. Flestir mælistaðir verða að vera við botn og bakka árinna þar sem viðnám rennslisins er mest.

Æskilegt er að fá sérfræðinga, frá t.d Orkustofnun, til að finna svokallaðan rennslislykil, til að sannreyna þær mælingar sem framkvæmdar hafa verið.



Mynd 6. Skrúfumæling

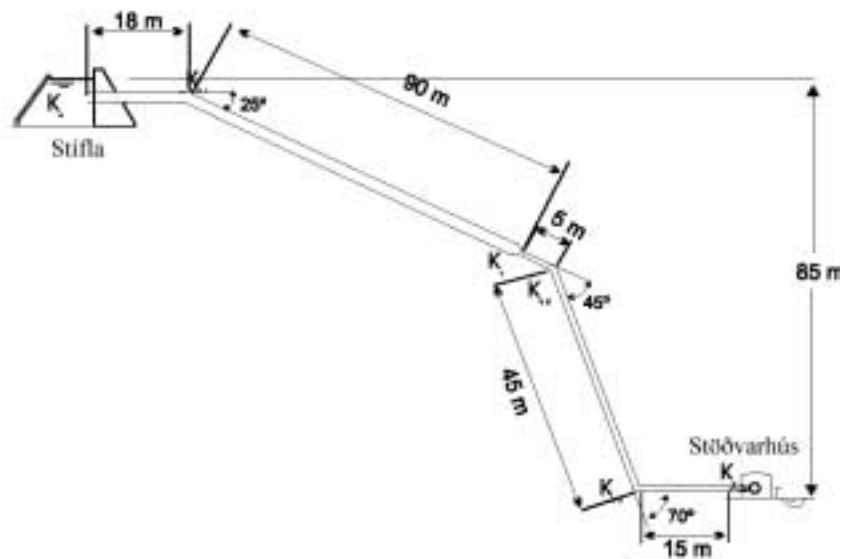
3.3 Hæðamælingar

Nauðsynlegt er að finna fallhæð, lengd og legu aðrennslispípu svo að hægt sé að áætla þrýstinginn sem virkjunin kemur til með að ráða yfir. Heildarfallhæð er hæðamismunur frá vatnsyfirborði uppistöðulóns niður að inntaki túrbínu, ef um bunutúrbínu er að ræða. Ef yfirþrýstitúrbína er notuð þá bætist hæð frárennslis við.

Virk fallhæð er fallhæð sem nýtist við raforkuframleiðslu, þ.e.a.s. heildarfallhæð mínus fallhæðartöp. Fallhæðartöp eru töp sem verða í inntaksristum og pípum.

Hæðamismunur er fundinn á nokkra vegu t.d með:

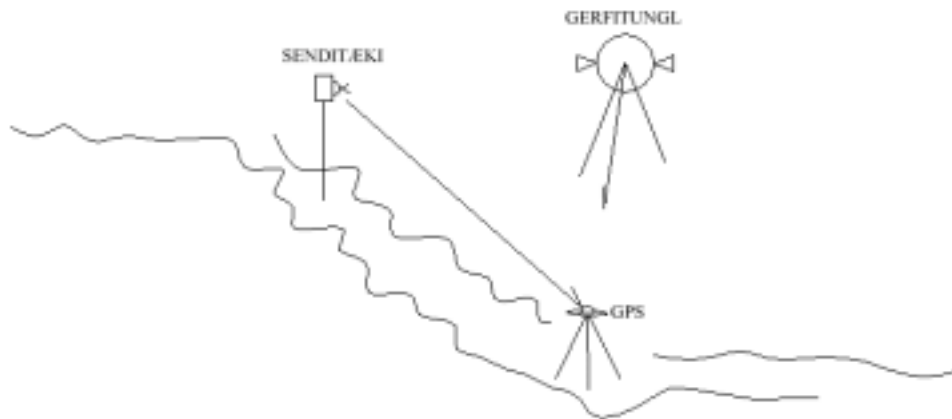
- 1) Landmælingatækjum
- 2) Hæðamæli



Mynd 7. Fallhæð

3.3.1 Hæðamæling með GPS

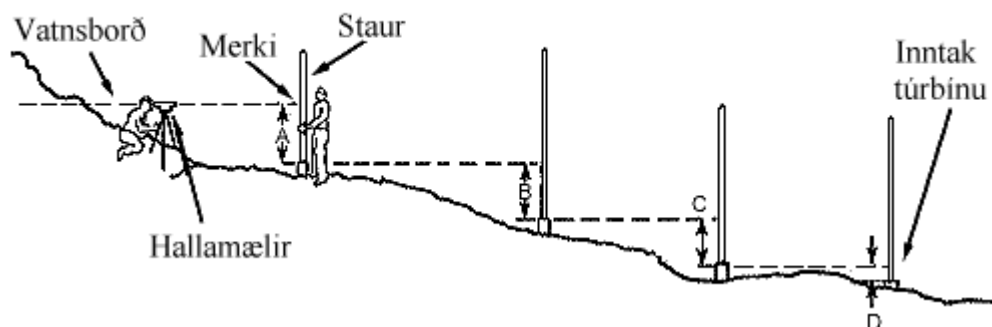
Einföld GPS göngutæki hafa mikla skekkju, allt að 10 metra, en það fer eftir staðsetningu gervitungla. Tækin teljast varla hæf til nákvæmra mælinga. Sérfræðingar nota mun vandaðari og dýrari búnað. Sá búnaður gefur mjög nákvæmar mælingar, allt að 4 mm.



Mynd 8. GPS hæðamæling

3.3.2 Hæðamæling með hæðakíki

Notaður er hæðakíkir á fæti og mælistika til að finna hæðina A, B, C, D og svo framvegis. Hæðirnar eru síðan lagðar saman til að finna heildarfallhæð.



Mynd 9. Hæðamæling

4 Uppbygging mannvirkja

Áður en framkvæmd við virkjun hefst er mikilvægt að allar grunnrannsóknir á jarðvegi og vatnsmælingu liggi fyrir og að kostnaður við stíflu, pípu og stöðvarhús sé ljós. Einnig ber að athuga hvort byggingarefni, svo sem sandur og grjót, séu í nánd við mannvirkin.

Þegar allur búnaður hefur verið valinn er fyrst hægt að gera kostnaðaráætlun fyrir virkjunina.

4.1 Aðrennslispípur

Við val á aðrennslispípum er tekið tillit til efnis, þvermáls, þrýstings, tegundar samsetninga og kostnaðar.

Þvermál pípa er haft þannig að það valdi ekki of miklum töpum miðað við kostnað. Þvermál pípunnar segir einnig til um rennslishraða vatnsins, þ.e.a.s. því grennri sem pípan er þeim mun meiri verður rennslishraði vatnsins. Þetta gerir það að verkum að núningstap í pípum eykst. Eftir því sem þrýstingur er meiri því sterkari þarf pípan að vera. Þess vegna getur pípan verið þynnri efst og þykkari neðst.

Helstu efni sem notuð eru í pípur eru stál, ál og plast. Áður voru notaðar steypu- og trépípur. Við val á pípu þarf að hafa í huga hversu vel efnið í pípunni endist þannig að ekki verði mikill viðhaldskostnaður.

Þegar pípur eru lagðar er nauðsynlegt að hafa beygjur sem minnstar því í hverri beygju verður þrýstingstap.

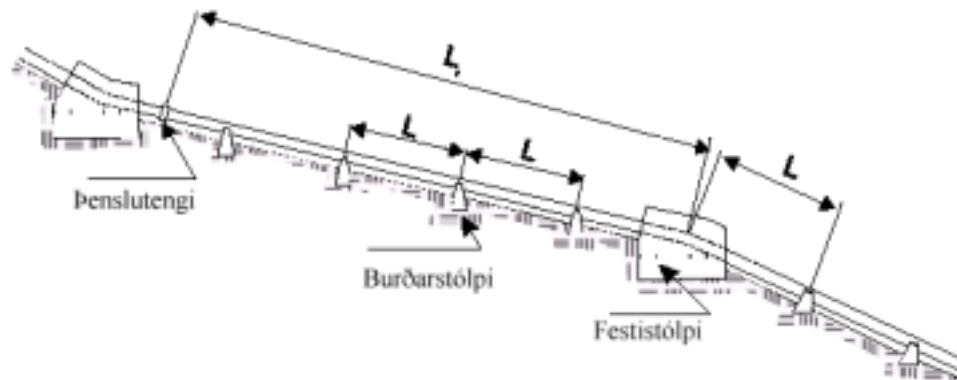
Gott getur verið að hafa fleiri en eina pípu til að auka rekstraröryggi stöðvarinnar.

Þegar lokað er skyndilega fyrir vatnsrennsli getur myndast vatnshögg sem getur sprengt pípu eða hún lagst saman. Þetta kemur til vegna þess að vatnsþrýstingurinn sem er í pípunni myndar annað hvort yfir eða undirþrýsting.

Til að verja pípu fyrir vatnshöggi þarf hliðarútrás við enda hennar, á milli aðallokunnar á pípunni og túrbínunni. Einnig er hafður öryggisloki sem opnast og hleypir út vatni ef þrýstingurinn í pípunni fer yfir ákveðið hámark. Gæta verður að alls staðar sé halli á pípunni þannig að ekki myndist lofttappi í pípunni sem hindrar rennslið.

Pípunar eru grafnar til að koma í veg fyrir þenslu á þeim vegna hitabreytinga. Pípur sem eru lagðar neðanjarðar eru grafnar niður á einn metra til að losna við hitamismun. Þegar pípunar eru lagðar með þessu móti þarf ekki sérstök þenslutengi.

Pípur eru einnig grafnar til þess að þær séu ekki eins áberandi í umhverfinu.



Mynd 10. Aðrennslispípa ofanjarðar

4.1.1 Plastpípur

Algennt er að nota plastpípur þar sem fallhæð er minni en 150 metrar. Þær eru ódýrar og auðvelt er að leggja þær. Plastpípur hafa lítið rennslisviðnám. Samsetning á plasti er mjög auðveld með tilkomu nýrra samsetningaefna. Algennt er að grafa plaströr í jörðu, en hægt er að fá sólarvörn í plaströrum og þá má leggja þau ofanjarðar. Þegar plaströr eru grafin er best að sanda vel undir og yfir og gæta þess að pípunar liggi ekki á oddhvössu grjóti sem getur valdið skemmdum á henni.

Þegar pípur eru lagðar ofanjarðar er nauðsynlegt að steypa stoð undir þær eða festa vel svo þær fari ekki á hreyfingu.

Einnig er vert að athuga að pípur geta þanist út og dregist saman við hitabreytingar. Því þarf að láta pípunar hvíla á hreyfanlegum undirstöðum.

4.1.2 Járnpípur

Járnpípur eru yfirleitt notaðar þar sem fallhæð er mikil, eða meiri en 150 metrar. Járnpípur eru einnig notaðar þar sem leggja þarf langa lögn ofanjarðar. Þá eru þær festar vel með steypufestingum sem halda þeim vel niðri svo að þær fari ekki á hreyfingu. Nauðsynlegt er að ryðverja járnpiður og klæða þær með einangrun. Járnpípur hafa mun meira rennslusviðnám en plastpiður. Mun meiri vinna er við lagningu járnpiðna og meiri kostnaður samfara þeim.

4.1.3 Tap í pípum, ristum og beygjum

Mikilvægt er að reikna út öll tölur sem verða í pípum, en þau eru misjöfn eftir því úr hvað efni pípunar eru. Einnig hafa allar beygjur og hlykkir mikil áhrif til aukningar á viðnámi og reikna þarf sérstaklega með þeim og draga frá fallhæðinni. Í raun er mesta tapið í pípunum sjálfum, svokallað núningstap. Tapið sem verður þegar vatnið fer í gegnum ristarnar og inn í pípunum er hverfandi.

Efni	Tegundir af efni $E(N/m^2)*10^9$	Leiðréttina- stuðull fyrir þenslu a $(m/m\ ^\circ C)*10^6$	Hámarks spennu- styrkur $(N/m^2)*10^6$	n Viðnáms- stuðull efnis
Ryðfrítt stál	206	12	400	0,012
Polyethylene	0,55	140	5	0,009
Polyvinyl chloride (PVC)	2,75	54	13	0,009
Asbestos cement	-	8,1	-	0,011
Steypujárn	78,5	10	140	0,014
Deigt járn	16,7	11	340	0,015

Tafla 2. Efni í þrýstipípum

Til að reikna út núningstap í pípu á hvern metra er best að nota Manning jöfnuna:

Jafna fyrir núningstap í pípum (Manning jafna):

$$\text{Jafna 4} \quad \frac{h_f}{L} = 10,3 \frac{n^2 Q^2}{D^{5,333}}$$

h_f = núningstap í pípum í m.

L = lengd á pípum í m.

n = viðnámsstuðull efnis

Q = rennsli í m^3

D = þvermál pípu í m.

Þegar jafna 3 er skoðuð sést að ef þvermál pípu er tvöfaldað þá minnka þrýstitöpin um 40 af hundraði.

Til að finna þvermál pípu, miðað við hámarks þrýstitap, er notuð jafna 5.

Jafna fyrir þvermál pípu:

$$\text{Jafna 5} \quad D = \left(\frac{10,3 n^2 Q^2 L}{h_f} \right)^{0,1875}$$

Ef h_f er takmarkað við 4% af heildarfallhæðinni, þá er hægt að reikna D ef Q , n og L , eru þekktar stærðir.

Jafna fyrir þvermál pípu:

$$\text{Jafna 6} \quad D = 2,96 \left(\frac{n^2 Q^2 L}{H} \right)^{0,1875}$$

Til að finna tapið sem verður á þrýstingi þegar vatn fer í gegnum inntaksristar þarf að finna rennslisraða vatnsins í gegnum ristarnar. Það er gert með jöfnu 7:

Jafna fyrir rennslisraða vatns:

$$\text{Jafna 7} \quad v_0 = Q * \frac{A+B}{A} * \frac{1}{C} * \frac{1}{\sin \alpha} = [m/s]$$

Q = rennsli í m³

A = lengd milli rimla í mm.

B = þykkt á rimum í mm.

C = flatarmál ristar m²

sin α = sinus af halla horni ristarinnar

Tap í gegnum inntaksristar eru reiknaðar með Klichner jöfnu.

Jafna fyrir tap í inntaksristum (Klichner jafna):

$$\text{Jafna 8} \quad h_r = Q * \left(\frac{B}{A}\right)^{4/3} * \left(\frac{v_0^2}{2g}\right) * \sin \alpha = [m]$$

Til að finna heildarnúningstap í rörinu er aftur notuð Manning jafnan:

Jafna fyrir núningstap í rörum:

$$\text{Jafna 9} \quad h_f = \frac{10,3n^2 Q^2}{D^{5,333}} * L$$

Til þess að finna tap í beygjum er best að leggja saman alla leiðréttinga stuðlana fyrir hverja beygju sem hægt er að fá í töflum. Einnig þarf að vita rennslisraða vatnsins í gegnum pípunum, það er gert með jöfnu 10:

Jafna fyrir rennslisraða í pípum:

$$\text{Jafna 10} \quad v_l = \frac{Q}{\frac{D^2 \pi}{4}} \quad v = \frac{Q}{A}$$

A = flatarmál rörsins (m)

Til að reikna beygjutöpin er notuð jafna 11, þar sem g = 9,81m/s²

Jafna fyrir heildartap í beygjum:

Jafna 11
$$h_e = \frac{\sum K v_l^2}{(2g)}$$

Beygja	K
25°	0,05
45°	0,085
90°	0,12

K er fasti miðað við beygjuhorn.

Tafla 3. Beygjustuðlar

Þegar búið er að reikna öll töpin í kerfinu eru þau dregin frá heildarfallhæðinni.

Jafna fyrir virka fallhæð:

Jafna 12
$$H_h = H - (h_f + h_e + h_r)$$

H = heildarfallhæð

H_f = núningstap í pípum

H_e = tap í beygjum

H_r = tap í inntaksristum

Nauðsynlegt er að finna út hve þykkt efnið í rörunum þarf að vera. Það er reiknað út með jöfnu 13:

Jafna fyrir veggþykkt pírna:

Jafna 13
$$e = \frac{P_1 D}{2\sigma_f}$$

e = þykkt í mm

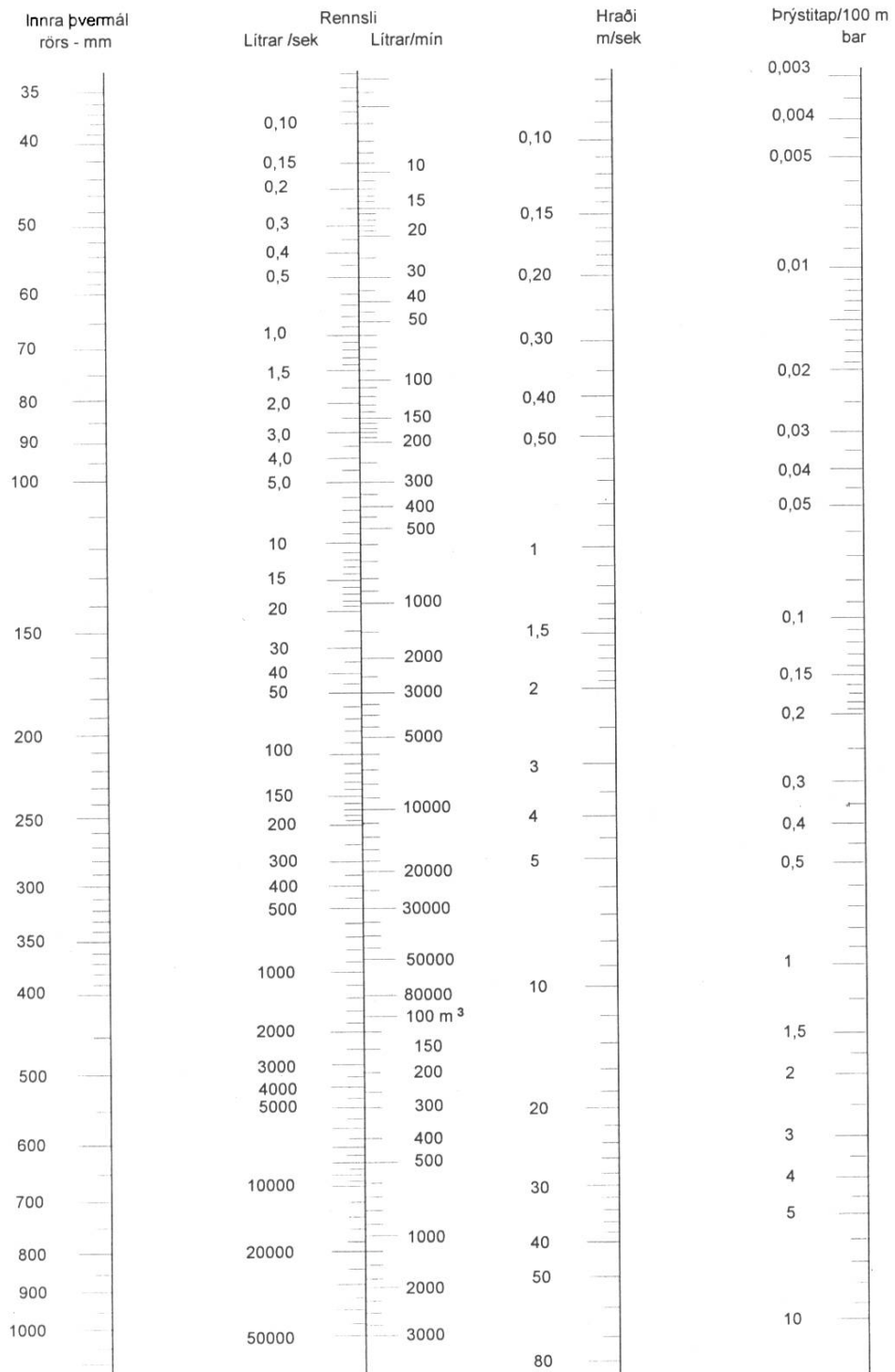
P₁ = vatnskraftur í kN/mm²

D = innra þvermál í mm

σ_f = styrkleiki efnis í pípu kN/mm²

Hægt að fá töflur frá framleiðendum pírna með upplýsingum um þrýstítap í pípum. Yfirleitt fylgja með upplýsingar um notkun þessara taflna. Hér á eftir er gefið dæmi um slíka töflu.

Tafla 4. Þrýstitap í plastpípum



Línuritið er notað á eftirfarandi hátt:

Reiknið innra þvermál rörsins í millimetrum, þ.e. $D_i = D_u - 2s$.

Finnið viðkomandi punkt á súlnni lengst til vinstri á blaðinu. Samband rennslis, rennslisraða og þrýstitaps má síðan lesa í beinni línu af hinum þrem súlnum, t.d. með hjálp reglustiku.

Einhverjar tvær af þessum fjórum breytistærðum verða þó að vera þekktar, til að línuritið komi að notum.

Línuritið má nota til viðmiðunar fyrir bein PEH eða PP rör, er flytja vatn við 10° C.

Hvert té, hné eða minnkun samsvarar 20 m viðbótarlengd rörs. Beygjur ($r = D_u$) samsvara u.þ.b. 10 m.

4.2 Uppbygging stíflumannvirkja

4.2.1 Stíflur

Tilgangur stíflu er að safna vatnsrennslinu saman og stýra því til virkjunarinnar. Þegar hugað er að stíflustæði þarf að athuga jarðveginn sem stíflan á að standa á. Hann þarf að vera traustur. Grafa þarf niður á klöpp til að steypa náí að bindast við klöppina. Gott er að staðsetja stífluna þar sem rennslishalli árinna er frekar lítill svo að framburður árinna dreifi úr sér á stærra svæði.

Algengast er að reisa stífluna úr járnbenntri steinsteypu en stundum er stíflan úr torfi og grjóti. Auk þess er hægt að nota timbur og járnplötur í minni ám. Stíflan er látin ná á milli bakka árfarvegsins. Ef það er ekki hægt eru steiptir stöplar og fyllt að þeim með frostþolnum jarðvegi.

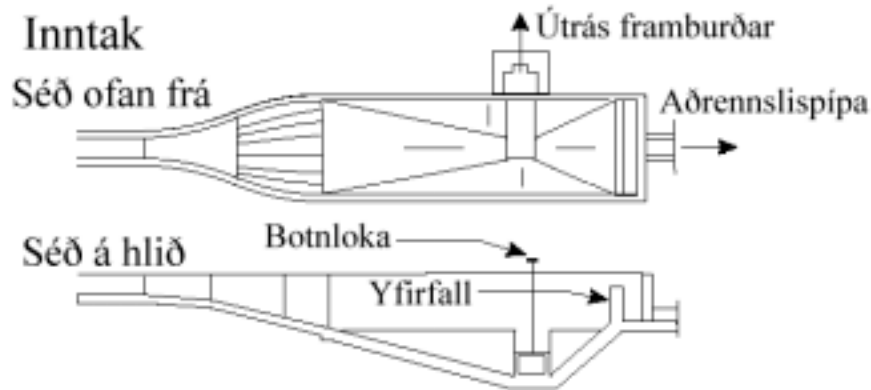


Mynd 11. Stífla Eyvindartungu

4.2.2 Botnlökur

Nauðsynlegt er að hafa botnlökur til að hleypa aur og möl, sem berst með straumnum, úr lóninu. Einnig er nauðsynlegt að geta tæmt lónið til að hægt sé að lagfæra stífluna og aðrennslispípu. Botnlökur er hægt að hafa á nokkra vegu, t.d. hleralökur. Þær eru settar saman úr einum eða fleiri hlerum sem eru hreyfanlegir upp og niður þannig að hægt sé að lyfta hleranum og skola út aur og möl. Hlerarnir eru oftast hreyfðir með handafli eða með drifbúnaði. Einnig er hægt að fá rafbúnað til að drífa lokurnar.

Mynd 12 er dæmi um hvernig hægt er að útfæra botnloku svo hún nái að hreinsa framburðinn.



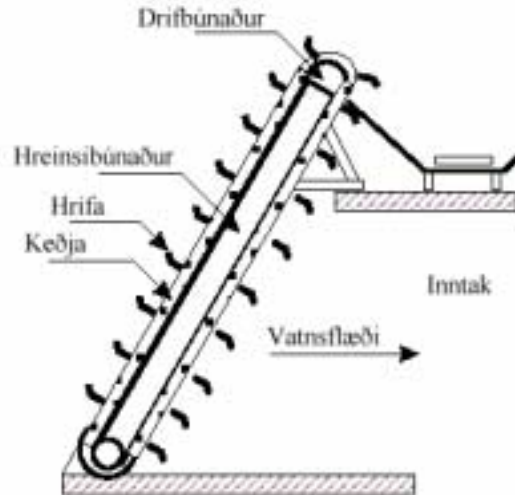
Mynd 12. Botnloka

4.2.3 Vatnsinntak

Inntaksrist hindrar að rusl og ís, sem flýtur á vatninu, fari inn í pípunu og valdi skemmdum á túrbínu. Framan við ristina þarf að vera stallur til að hindra að framburður komist inn í rörið. Inntaksrist er yfirleitt gerð úr járni sem fest er upp á rönd á burðargrind. Bilið milli ristanna er mismunandi eftir aðstæðum (20-300 mm), þ.e.a.s. eftir því hve mikil óhreinindi og ísing er í vatninu. Ristarnar eru settar upp þannig að þær myndi 70-80° horn við lárétt.

Nauðsynlegt er að hreinsa ristarnar reglulega, sérstaklega þegar ísing er mikil og í vorleysingum þegar mosi og annar gróður fer í ána.

Til er sjálfvirkur hreinsibúnaður fyrir ristar sem gott er að nota þar sem framburður er mikill. Það er þó óþarflega dýr búnaður fyrir litlar virðjanir sem mega ekki kosta mikið.

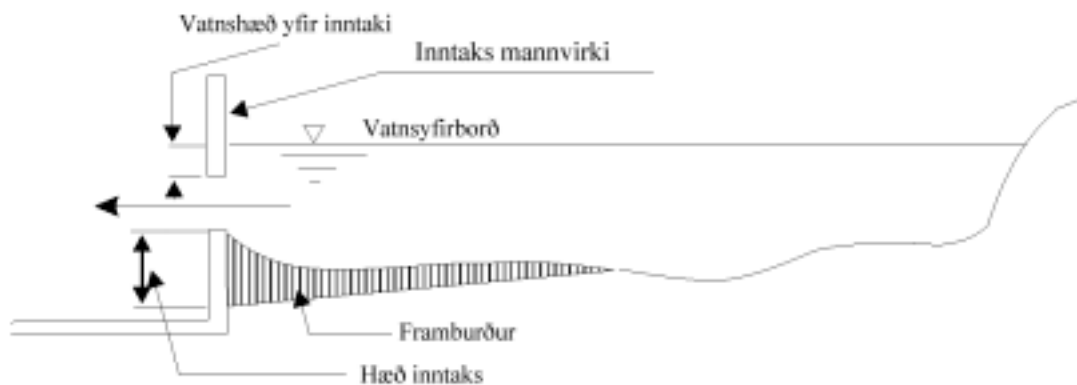


Mynd 13. Sjálfvirkur hreinsibúnaður

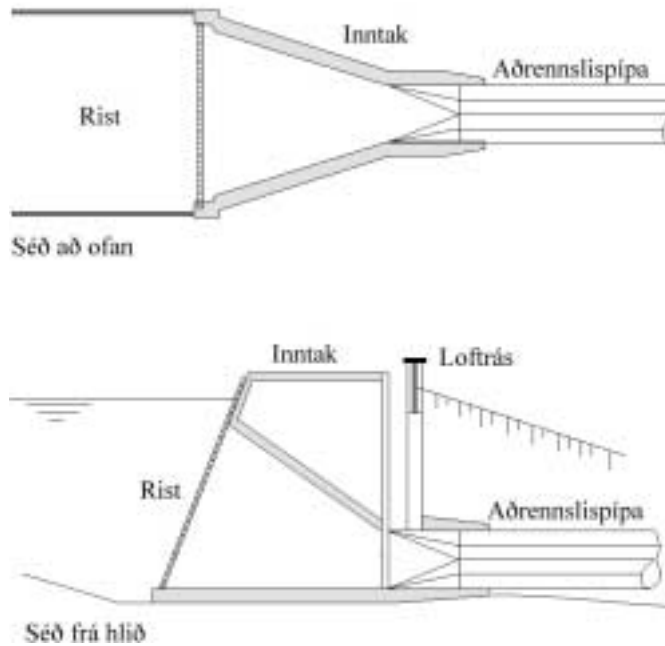
Mynd 14 og 15 sýna dæmigerða útfærslu á vatnsinntaki aðrennslispípu. Inntakshæð er haldið töluvert fyrir ofan botn árinna til að hindra að framburður stífla eða renni um inntakið.

Hægt er að nota botnloku stíflunar til að hreinsa framburð sem annars myndi safnast fyrir framan inntakið.

Vatnshæð í lóninu er haldið töluvert yfir inntaki svo að ísing, sem getur myndast í lóninu, hindri ekki rennsli um inntakið.



Mynd 14. Inntaksmannvirki



Mynd 15. Vatnsinntak

4.3 Uppbygging stöðvarhúss

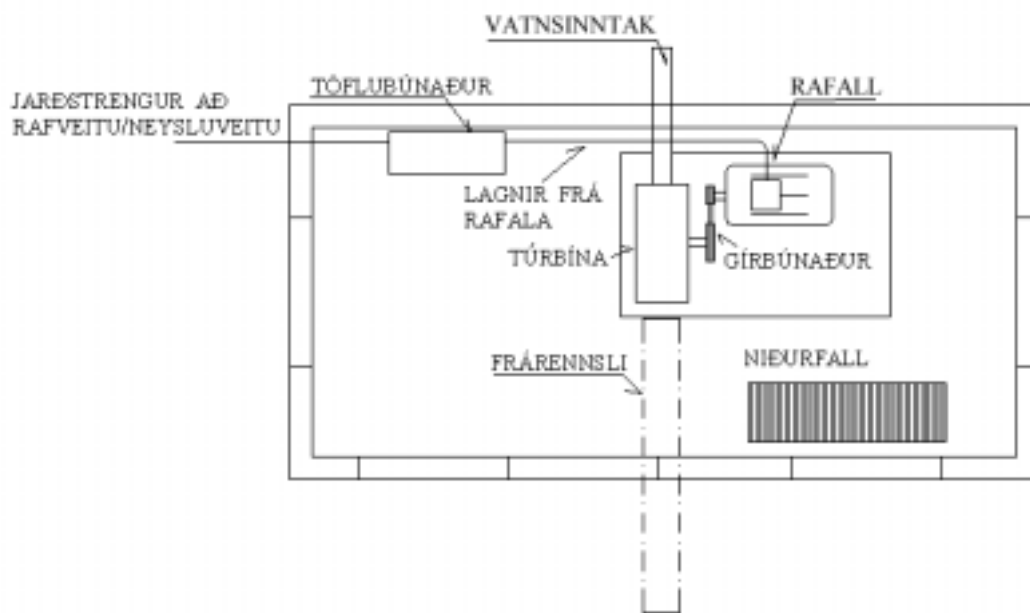
Í virkjunum hefur stöðvarhús það hlutverk að vernda búnað virkjunarinnar. Stærð og lega búnaðar stjórna lögum stöðvarhúss ásamt áætlaðri fallhæð og landslögum á staðnum.

Þegar túrbínugerð hefur verið valin og allur búnaður í kringum hana, er hægt að velja stærð og lögum stöðvarhúss. Stærð stöðvarhússins ákvarðast af vélasamstæðunni sem valin hefur verið, töflubúnaði og vinnuástöðu. Stöðvarhús er byggt á traustum grunni sem hvílir á steiptum sökklum.

Frárennsli virkjunarinnar hefur það hlutverk að leiða vatn burt eftir að það er búið að fara í gegnum vélarnar. Oftast er það leitt út í upprunalega farveginn. Yfirleitt er frárennslisskurðurinn stuttur því í flestum tilvikum er leitast eftir því að láta stöðvarhúsið standa nálægt bökkum árinna. Kostnaður við frárennslið er oftast lítill og fer eftir því hvort um er að ræða bunutúrbínur eða yfirþrýstítúrbínur.

Ef valinn hefur verið bunutúrbína þarf rás í gólfíð svo að vatnið hafi auðvelda framrás frá stöðvarhúsinu. Ef valið hefur verið cross flow bunutúrbína er hún vanalega látinn nýta soghæðina frá túrbínunni og er þá settur ventill til að

takmarka vatnshæðina í sográsinni. Ef yfirprýstitúrbína verður fyrir valinu er frárennslisrör lagt í gegnum vegginn eða gólfið og þaðan leitt út í frárennslíð. Gera þarf ráð fyrir niðurfalli í gólfinu sem leiðir allt vatn sem hugsanlega getur komið ef leki á sér stað. Þegar botnplata hefur verið steypd eru veggir hússins annaðhvort steyptir eða byggðir úr timbri, t.d. timburgrind sem er síðan klædd. Hurðargat þarf að vera nægilega stórt til að vélabúnaður komist inn. Gluggar verða að vera á hliðum svo að birta sé góð. Einnig þarf að huga að loftræstingu því hiti getur verið mikill yfir sumartímann.



Mynd 16. Stöðvarhús



Mynd 17. Stöðvarhús Eyvindartungu

5 Túrbínur

Í túrbínu er orku vatns breytt í vélræna orku. Túrbínur eru flokkaðar í bunutúrbínur og yfirprýstitúrbínur.

Yfirprýstitúrbínur

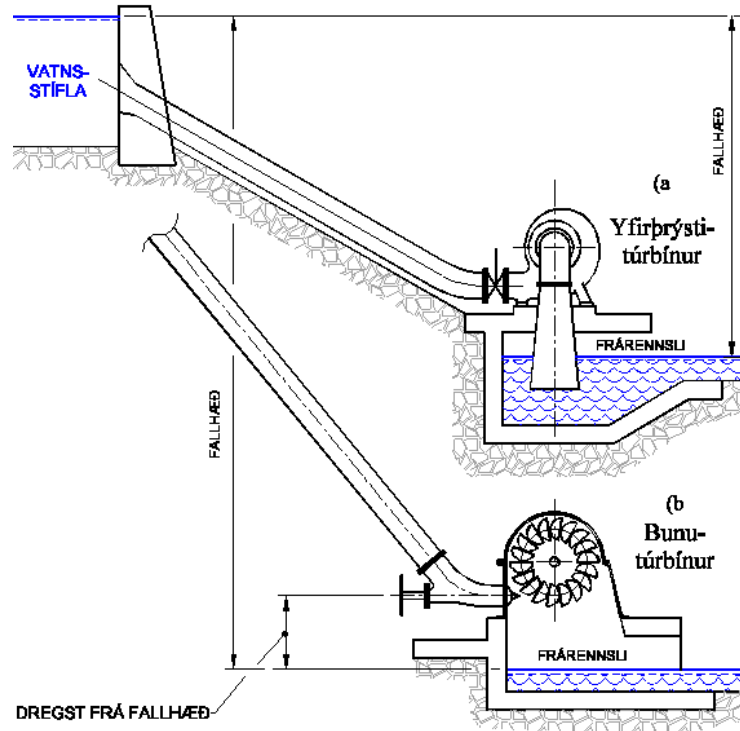
Mismunur er á þrýsting ofan við og neðan við túrbínuhjólið. Þegar vatnið kemur í túrbínuhjólið inniheldur það, auk hreyfiorkunnar, nokkuð af stöðuorku. Á meðan vatnið streymir eftir hólfum túrbínuhjólsins, sem er alveg fullt af vatni, vex hraði vatnsins vegna yfirþrýstings. Stöðuorka þess breytist í hreyfiorku. Vatnið gefur því frá sér bakþrýsting á skóflur hjólsins um leið og það fer úr hjólinu.

Meðal sérkenna yfirprýstitúrbína er sogpípa sem gengur niður í frárennslirásina. Með því að nota sögið er allt fallið notað, bæði með þrýstingi og með sögi frárennslisins. Notkunarsvið túrbínu af þessari gerð er því aðallega við meðalhátt og lágt fall.

Bunutúrbínur

Vatnsþrýstingur er jafn fyrir ofan og neðan túrbínuhjólið. Þegar vatn kemur í túrbínuhjólið inniheldur það einungis hreyfiorku. Óhindruð vatnsbuna streymir inn í vatnshjólið og snertir ekki bakhlið skóflunnar. Vatnsbunan skriður eftir skóflufletinum og breytir um stefnu. Við það þrýstir hún á skóflurnar og veldur snúningsátaki á hjólið.

Sérkenni bunutúrbínu er að vélin er ekki í neinni snertingu við frárennslid. Bein afleiðing af þessu er að vélin notar einungis aðstreymishæðina en hjólahæðin og frárennslishæðin nýtast ekki. Túrbínur af þessari gerð eru notaðar við hærra fall. Þess vegna verður hið tapaða fall hverfandi lítill hluti af fallhæðinni.



Mynd 18. a) Yfirþrýstítúrbínur b) B unutúrbínur

Yfirþrýstítúrbínur skiptast í:

- Francis
- Kaplan
- Propeller

B unutúrbínur skiptast í:

- Pelton
- Turgo
- Cross-flow

Túrbínur eru valdar með tilliti til:

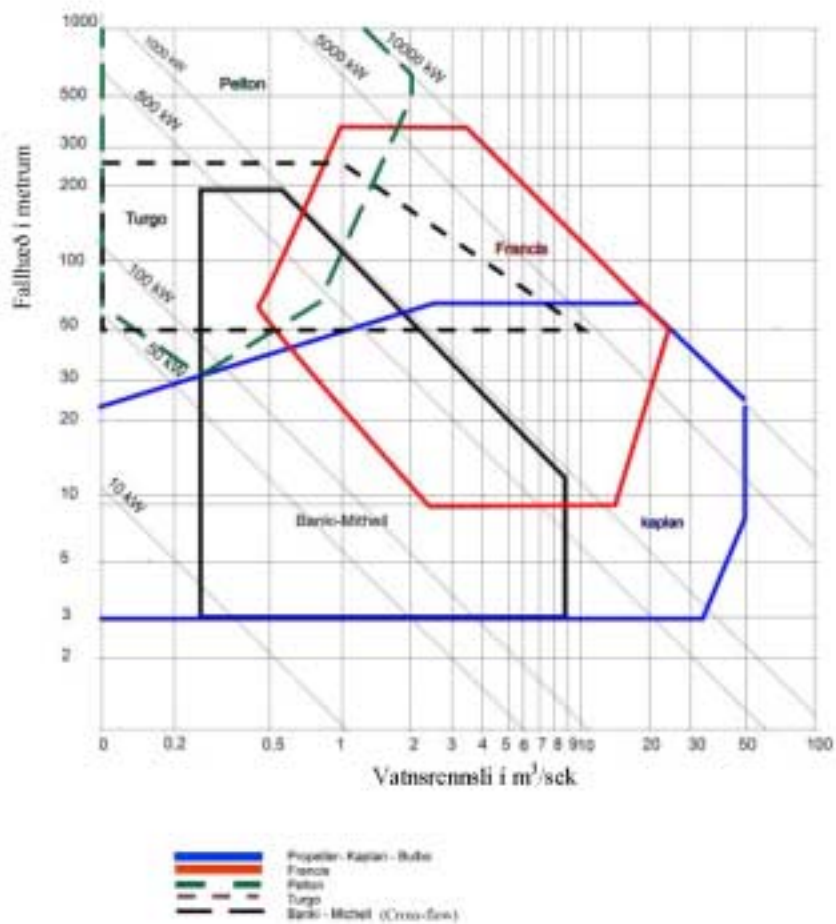
- Virkrar fallhæðar
- Vatnsmagns
- Snúningshraða
- Verðs
- Nýtni

Tafla 5 sýnir sviðið sem túrbínur ná yfir. Taflan sýnir að hægt er að velja nokkrar tegundir við ákveðnar fallhæðir.

Túrbínu tegund	Fallhæð í metrum
Kaplan og Propeller	$2 < H < 40$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1300$
Michel-Banki (Cross-flow)	$3 < H < 250$
Turgo	$50 < H < 250$

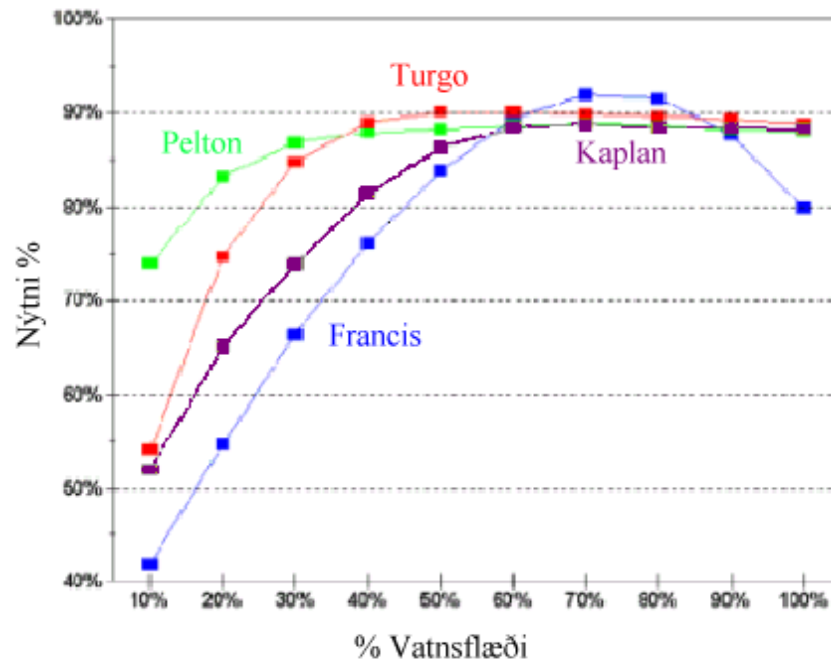
Tafla 5. Virknisvið túrbínuteygunda

Þegar vatnsmagn hefur verið mælt er hægt að velja túrbínu með tilliti til þess. Hægt er að styðjast við mynd 19 þegar velja á tegund túrbínu.



Mynd 19. Virknisvið

Hafa þer í huga að túrbínur hafa misjafna nýtni eftir vatnsmagninu sem fer í gegnum þær. Mynd 20 sýnir nýtni nokkurra túrbína miðað við hlutfallslegt vatnsflæði.



Mynd 20. Nýtni túrbína miðað við vatnsflæði

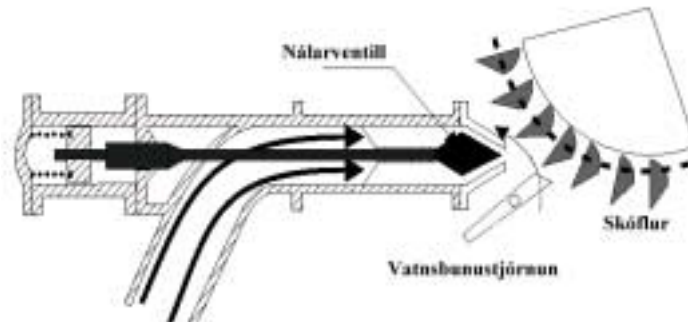
5.1 Slittæring (cavitation)

Þegar hreyfiorka vatns fellur niður fyrir suðuprýsting, verður mótun í suðunni. Þetta fyrirbæri hvetur til myndunar á litlum sjálfstæðum loftbólum. Þær myndast á svæði lágs þrýstings og eyðast svo aftur við háan þrýsting þar sem loftbólurnar þrýstast saman og springa. Eyðing loftbólna myndar mjög hátt þrýstingshögg og því fylgir talsverður hávaði. Hávaðinn er svo mikill að túrbínan hljómar eins og það renni möl í gegnum hana. Endurtekningar á slíkum þrýstibylgjum nálægt vegg túrbínu veldur eyðingu á tæringarvarnarhúð og jafnvel á málminum. Tæringin ræðst síðan á óvarin svæði og djúpar holur myndast.

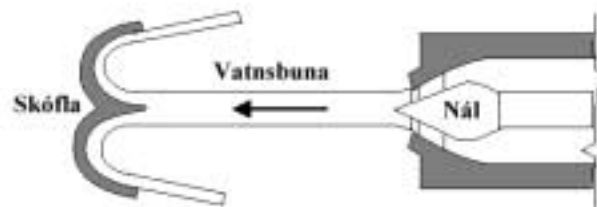
5.2 Pelton túrbína

Pelton túrbínur eru bunutúrbínur. Þær eru algengastar í litlum rafstöðum á Íslandi. Ástæðan fyrir því er sú að þær þurfa hlutfallslega lítið vatnsmagn til að geta starfað. Pelton hreyfill er með skófluhjóli og bunustútum, einum eða fleiri, það fer eftir framleiðslunni.

Pelton túrbínur eru efnislitlar og vega lítið. Þar af leiðandi eru þær ódýrar. Pelton túrbínur hafa mjög góða nýtni jafnvel þó þær séu keyrðar langt undir hámarksflæði. Einnig hefur Pelton þann kost að hafa vatnsbunustjórnun. Þegar stöðva þarf túrbínu er hægt að beina vatninu frá vatnshjólinu og loka fyrir vatnið. Þetta gerir það að verkum að áhrif vatnshöggs eru engin.



Mynd 21. Pelton túrbína

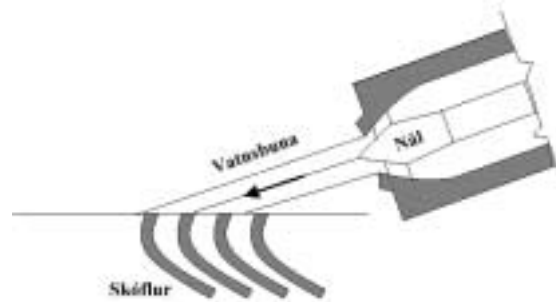


Mynd 22. Pelton túrbína

5.3 Turgo túrbínur

Eins og Pelton er Turgo túrbínan bunutúrbína en skóflur hennar eru formaðar öðruvísi. Bunan strýkur skóflurnar á annan hátt, eða með 20° halla og snertir skófluna frá annarri hliðinni en yfirgefur hana frá hinni. Ef bornar eru saman Turgo og Pelton þá verður að viðurkenna takmörk Pelton túrbínu, þar sem vatnið sem yfirgefur skóflurnar hefur áhrif á samliggjandi skóflur. Þetta hefur það í för með sér að Turgo túrbína býr yfir hærri snúningshraða. Hærri snúningshraði gefur hugsanlega möguleika á ástengingu við rafal sem gerir drifbúnað óþarfann. Í framhaldi eykst nýtni túrbínunnar og viðhaldskostnaður minnkar.

Turgo túrbínan er viðkvæmari fyrir aðskotahlutum en Pelton.



Mynd 23. Turgo túrbína

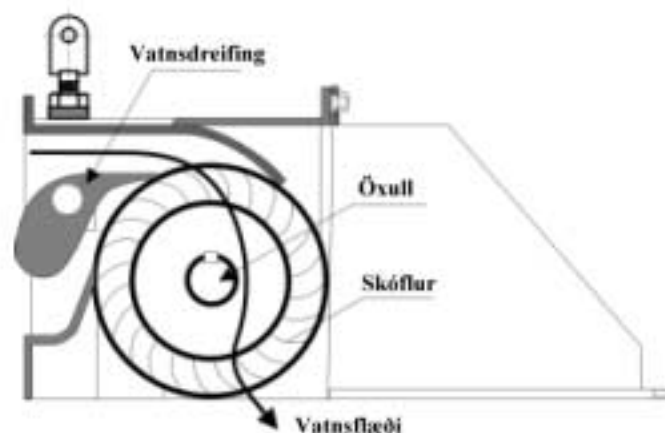
5.4 Cross-flow túrbínur

Cross-flow túrbína er einnig þekkt undir nafninu Banki-Michel eftir þeim sem fundu hana upp. Hún er líka kölluð Ossberger eftir fyrirtæki sem hefur haft hana til sölu í meira er 50 ár.

Þessar túrbínur hafa gildissvið yfir 3-200 m. fallhæð og vatnrennsli upp á 20 lítra/sek – 10m³/sek. Nýtni túrbínunnar er minni en í hefðbundnum bunuturbínunum, en helst næstum eins yfir stórt gildissvið yfir hæð og rennsli (dæmigerð nýtni er um 80%).

Cross-flow túrbína er mjög auðveld í smíði, sem gerir hana ódýra.

Ókostur er að framburður í vatninu getur fest í túrbínuhjólinu og skemmt það. Þær eru einnig hæggengar.

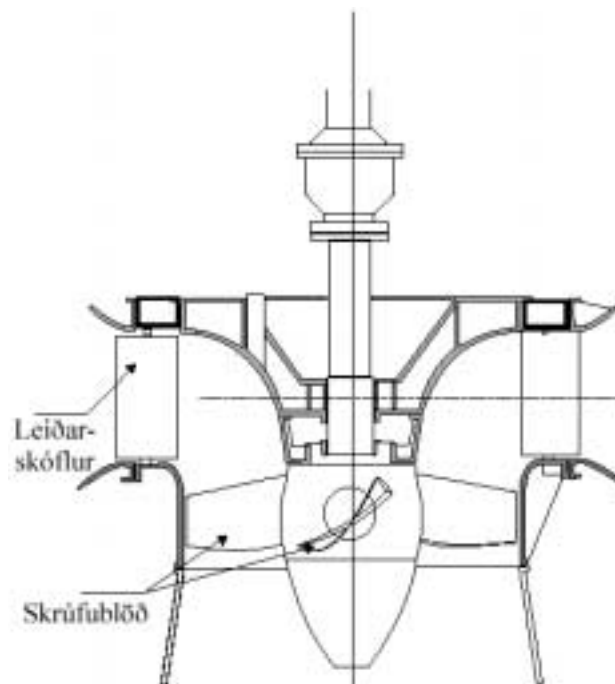


Mynd 24. Cross-flow túrbína

5.6 Kaplan og Propeller túrbínur

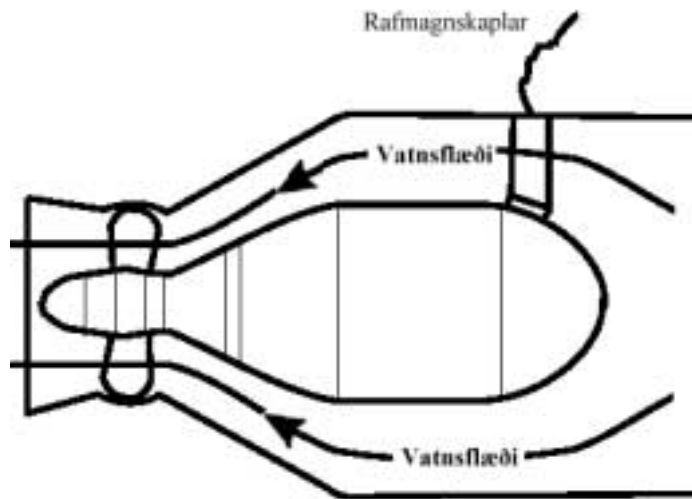
Kaplan og Propeller eru yfirþrýstítúrbínur með áslægu rennsli. Þessar túrbínur eru notaðar við lágt fall. Kaplan túrbína hefur stillanleg skrifublöð og þá er hún kölluð einstillanleg. Einnig getur hún haft stillanlegar leiðarskóflur og þá er hún skilgreind sem tvístíllanleg. Propeller túrbína er notuð þegar virk fallhæð og vatnsmagn helst stöðugt.

Á mynd 27 er sýnd tvístýranleg Kaplan túrbína (hefur bæði leiðarskóflur og stillanleg skrifublöð).



Mynd 27. Kaplan túrbína

Bulb túrbína á rætur að rekja til Kaplan túrbínu. Rafallinn og girinn eru staðsettir inn í túrbínunni í vatnsheldu hylki og aðeins rafleiðararnir standa út.



Mynd 28. Bulb túrbína

6 Rafalar

Rafalar breyta hreyfiorku vatns í raforku. Raforka er mæld í vattstundum, kílóvattstundum eða gígavattstundum. Aflið sem virkjun framleiðir er ekki vatnsaflið sem virkjunin býr yfir, heldur vastnsaflið mínus töp í búnaði.

Rafallinn er annað hvort beintengdur við öxul vatnshjólsins eða gíraður með reim, keðju eða tannhjóladrifbúnaði. Túrbínur geta verið láréttar eða lóðréttar, það þarf að hafa í huga þegar rafallinn er valinn, en í minni virkjunum er túrbínan lárétt. Snúningshraði vélasamstæðu (n) er bundin af vélasamstæðu á eftirfarandi hátt.

Jafna fyrir snúningshraða rafvéla:

$$\text{Jafna 14} \quad n = \frac{60 * f}{p}$$

f = netíðni (50Hz)

60 = sek í mín.

P = fjöldi pólpara í rafala

Fjöldi pólpara= p	1	2	3	4	5	6
Snúningshraði á mín = n	3000	1500	1000	750	600	500

Tafla 6. Fjöldi pólpara / snúninghraði á mín. fyrir samfasa rafala $f = 50$ Hz

Ef um er að ræða ósamfasa rafal þá er snúningshraðinn u.þ.b. 1% hærri.

Til eru þriggjafasa, einfasa og DC-rafalar. Í flestum smávirkjunum er notaður þriggja fasa rafall.

Val á rafal fer eftir stærð virkjunar og hvernig rekstri hennar er háttað, þ.e.a.s. hvernig neti rafallinn á að tengjast. Í minni virkjunum eru notaðir staðlaðir rafalar vegna þess að sérsníðaðir rafalar eru mun dýrari. Til eru staðlaðar stærðir fyrir 400V spennu allt að 1400kVA.

Ef óskað er eftir að virkjun sé starfhæf, þrátt fyrir að rafdreifikerfið verði spennulaust, þarf að nota samfasa rafal. Ef rafallinn á eingöngu að geta gengið þegar netið er í rekstri er valinn ósamfasa rafall vegna einfaldari og ódýrari búnaðar. Þessar tvær tegundir rafala eru þær einu sem notaðar eru.

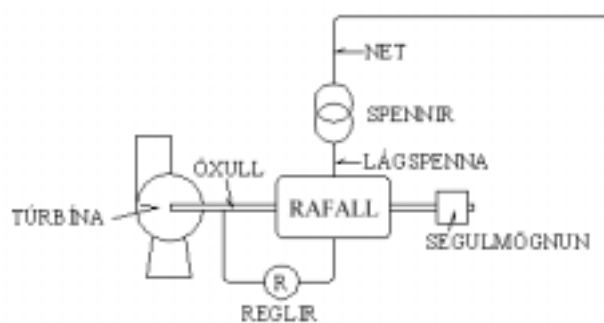
Í minni gerðum rafala þarf ekki sérstaka kælingu, en stærri rafalar eru oftast loft- eða vatnskældir.

6.1 Samfasa rafalar

Samfasa rafalar hafa sjálfstæða jafnstraums segulmögnun. Til að tengja rafal við net þarf að samfasa hann við raforkunetið. Einnig þarf að stýra vélinni þannig að hún fari ekki að framleiða of háa spennu eða tíðni. Til þess að stýra vélinni er notuð álagsstýring, eða gangráður, sem stýrir hraða vatnshjólsins og þar með framleiðslu rafmagnsins. Samfasa rafalar eru mun dýrari en ósamfasa m.a. vegna flókens stýribúnaðar.

Segulmögnun getur annað hvort verið frá DC-rafal, sem er tengdur beint við öxulinn frá túrbínunni, eða tekin beint af rafhlöðum.

Til að samfasa rafal við netið er hann keyrður upp í rétta spennu og tíðni miðað við netið sem hann á að tengjast við. Ef samfasa rafall er tengdur við sjálfstætt net, þá er rafallinn keyrður upp í rétta spennu og tíðni og honum stýrt með álagsstýringu eða gangráð.



Mynd 29. Samfasa rafall

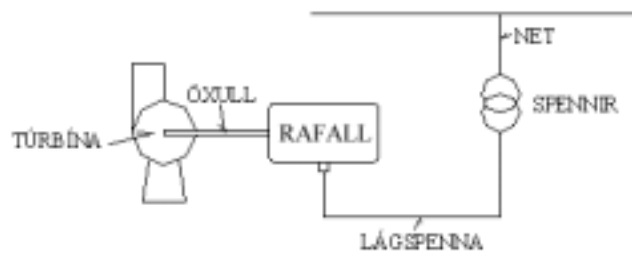
6.2 Ósamfasa rafalar

Ósamfasa rafalar eru í raun venjulegir riðstraums mótórar sem eru beintengdir við netið. Ef mótórar er keyrður á yfirsúnig, verður hann að rafal og fer að framleiða rafmagn. Segulmagnun ósamfasa rafals er tekin beint af netinu, þannig að öll gangstýring rafals er óþörf. Ef fasvik er mikið er hægt að leiðrétta það með því að tengja þetta við rafalinn.

Helsti ókostur ósamfasa rafala er að þeir geta ekki framleitt rafmagn þegar rafmagn fer af netinu.

Helsti kostur ósamfasa rafala eru; hann er ódýrari en samfasa rafall, ekki þarf gangstýringu og samfösunar búnað.

Ef notaður er ósamfasa rafall verður netið, sem virksjunin á að tengjast við, að vera a.m.k. 10 x sterkara en framleiðsluafli virksjunar.



Mynd 30. Ósamfasa rafall

7 Tæknilegar upplýsingar

Með tilkomu tölvubúnaðar hefur mikil þróun átt sér stað varðandi stýringar á rafbúnaði. Vélbúnaður hefur nánast staðið í stað. Það helsta sem hefur breyst er að betri efni, s.s. stál og ýmiskonar plastefni, hafa verið tekin í notkun.



Mynd 31. Gamli tíminn



Mynd 32. Nýi tíminn

7.1 Samfösun

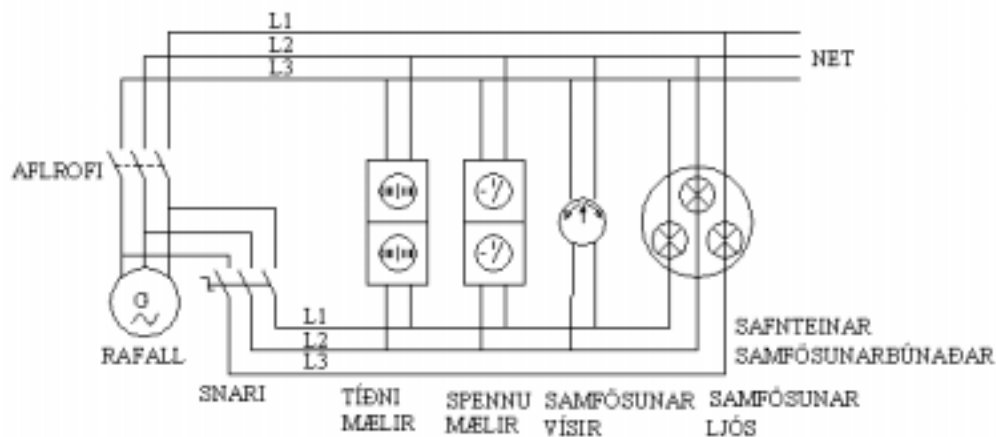
Þegar tengja á samfasa rafal við netið þarf að samfasa rafalinn við netið.

Samfösunarbúnaður er staðsettur í tengiskáp og samanstendur af eftirfarandi búnaði:

1. Tveimur spennumælum, sem sýna spennu á rafal og neti.
 2. Tvöföldum tíðnimæli til að fylgjast með tíðni á rafal og neti.
 3. Samfösunarvísi sem sýnir þegar spennur rafals og nets falla saman.
 4. Samfösunarljós sem segja til um hvenær tengja má rafalinn og netið.
- Hægt er að tengja ljósin á tvo vegu. Önnur tengingin er svokölluð dimm tenging. Þá tengist pera 1 á milli fasa L1 á neti og L1 á rafal o.s.frv. Þegar

slökkt er á öllum perunum má samfasa. Hin tengingin er stundum nefnd dimm/ljós. Þá er pera 1 tengd milli L3 á neti og L1 á rafal. Þegar slökkt er á peru 2, sem er sú eina sem tengd er á milli sama fasa í rafal og á neti, þá má samfasa.

5. Samfösunarsnara sem tengir rafal við samfösunarbúnað.
6. Aflofa sem tengir rafal við netið þegar öllum skilyrðum samfösunar er fullnægt.



Mynd 33. Samfösunarbúnaður

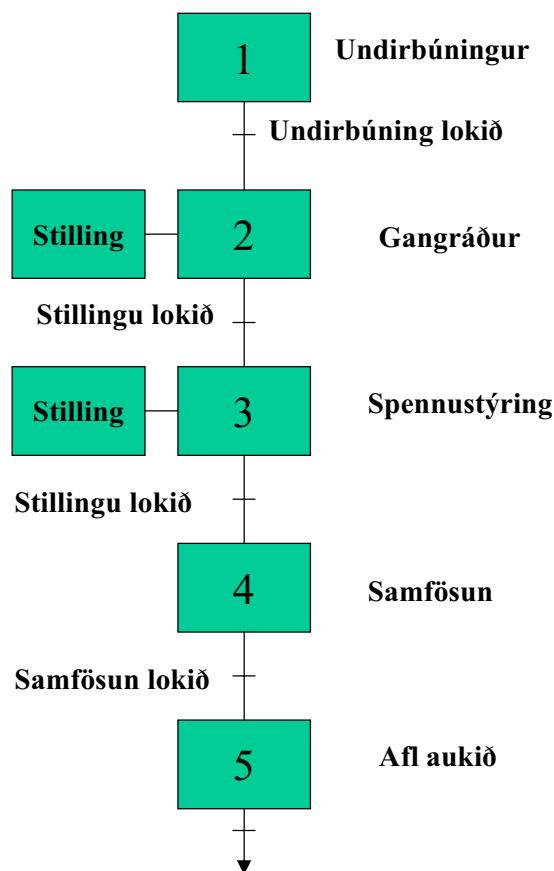
Skilyrðin sem þarf að uppfylla við samfösun eru eftirfarandi:

1. Að sama spenna sé á rafal og neti.
2. Að spennurnar hafi sömu tíðni (50 Hz).
3. Að velja rétta augnablikið til þess að tengja með aflrofanum, þ.e. þegar spenna rafals og nets eru í sama fasa.
4. Að sama fasaröð sé á rafal og á neti. Það er best að sjá á samfösunarljósum þegar notuð er dimm tenging því þá blikka allar perurnar í takt.

7.1.1 Framkvæmd samfösunar

1. Undirbúningsvinna rafals og túrbínu þarf að vera lokið.
2. Athuga þarf tíðnimæli í tengiskáp. Gangráður vélarinnar á að sjá um að hún fari á réttan snúning og að tíðnin sé rétt.

3. Athuga þarf spennumæli. Sjálfvirk spennustýring sér til þess að spennan verði rétt. Ef hún er ekki rétt þarf að fínstilla spennuna með stilliskrúfu á spennustýringunni.
4. Fylgjast þarf með samfösunarvísi eða ljósum. Óhætt er að samfasa vélina þegar ljós eða vísir er á réttum stað.
5. Þegar búið er að samfasa vélina þarf að auka aflframleiðslu rafalsins með því að auka vatnsmagnið inn á vélina. Við það leitast túrbínan við að auka snúningshraðann og rafallinn framleiðir meira raunafl. Snúningshraðinn helst óbreyttur. Sjá flæðirit mynd 34.

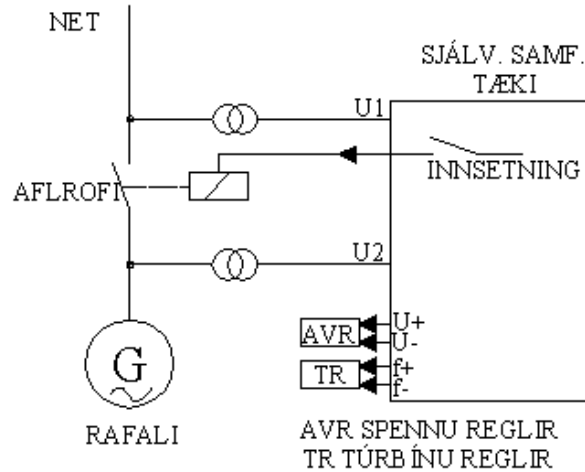


Mynd 34. Flæðirit fyrir samfösun

7.2 Sjálfvirk samfösun

Til er sjálfvirkur samfösunarbúnaður sem gerir samfösun einfalda. Búnaðurinn er samsettur úr spennu- og tíðnimælum, tölvubúnaði, spennuregli og túrbínuregli. Tölvubúnaðurinn er tengdur spennu- og túrbínuregli sem

keyrir upp spennu og tíðni og heldur því stöðugu áður en tengt er. Samfösunarbúnaðurinn vinnur beint á aflrofann sem tengir rafalinn við netið, þannig verður samfösunin sjálfvirk.



Mynd 35. Sjálfvirk samfösun

7.3 Varnarbúnaður og leiðarar

Við samkeyrslu rafals við netið verður að tryggja að rafallinn leysi út ef spenna hans fer út fyrir ákveðin mörk. Einnig þarf að gæta þess að rafallinn fari ekki að vinna sem mótör og taki til sín afl, og að ekki sé mikill spennunumur milli fasa. Setja þarf yfir- og undirspennuvarnir til að fylgjast með spennunni, einnig þarf undir- og yfirtíðnivarnir og bakafllsvörn til að tryggja að rafallinn taki ekki til sín afl. Einnig þarf skammhlaupsvörn fyrir rafkerfið. Nauðsynlegt er að jarðtengja allan búnað vel þannig að ekki sé hætt á að hann verði fyrir skemmdum af völdum bilunarstraums og einnig að starfsmenn eigi ekki á hættu að verða fyrir bilunarstraum. Ganga skal frá jarðbindingum í samræmi við reglugerð um raforkuvirki.

7.3.1 Leiðarar frá rafstöð að tengivirki

Rafleiðarar geta bæði verið jarðstrengir og loftlínur. Í dag eru notaðir jarðstrengir vegna mikils kostnaðar við að leggja loftlínu og viðhalda henni.

Við val á jarðstreng þarf að athuga hve há flutningsspenna á að vera. Einnig þarf að hafa í huga hve langt rafstöðin er frá þeim stað þar sem tengt er við netið, eða hvar notkun rafmagnsins er.

Val á jarðstreng er stór þáttur í virkjunaframkvæmd, því honum fylgir umtalsverður kostnaður.

Þar sem um langar vegalengdir er að ræða þarf oft að hækka spennuna og flytja orkuna á háspennu vegna minna spennufalls.

Til að reikna út spennufall sem verður í jarðstreng, þarf að vita hve mikið afl og hve háa spennu rafstöðin framleiðir. Til að finna spennufallið þarf fyrst að reikna út strauminn sem strengurinn á að flytja.

Jafna fyrir straum í leiðara í 3 fasa kerfi:

$$\text{Jafna 15} \quad I = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi}$$

I = straumur amper (A)

P = vött (W)

U = spenna volt (V)

$\cos\varphi$ = fasvik rafal

Þegar búið er að finna strauminn er gildleiki strengsins valinn út frá töflu sem sýnir þvermál leiðara miðað við straum. Þegar strengur hefur verið valinn er hægt að reikna spennufallið í honum. Tafla 7 er tekin upp úr Reglugerð um raforkuvirki.

Flokkur 1. Ein eða fleiri einleiðis taugar í pípu (t.d. plasteinangraðar ídráttartaugar).

Flokkur 2. Fjölleiðaleiðslur, t.d. plaststrengir, blýstrengir og lausataugar.

Flokkur 3. Einleiðisleiðslur, lagðar utan á þannig að bilið milli þeirra sé að minnsta kosti jafnt þvermáli leiðslanna. Einnig einleiðis tengileiðslur innan rofa- og dreifivirkja (-skápa, -klefa) og í straumteinarenum.

Málgildleiki mm ²	Flokkur 1		Flokkur 2		Flokkur 3	
	Cu A	Al A	Cu A	Al A	Cu A	Al A
0,75	-	-	13	-	16	-
1	12	-	16	-	20	-
1,5	16	-	20	-	25	-
2,5	21	16	27	21	34	27
4	27	21	36	29	45	35
6	35	27	47	37	57	45
10	48	38	65	51	78	61
16	65	51	87	68	104	82
25	88	69	115	90	137	107
35	110	86	143	112	168	132
50	140	110	178	140	210	165
70	175	-	220	173	260	205
95	250	-	265	210	310	245
120	-	-	310	245	365	285
150	-	-	355	280	415	330
185	-	-	405	320	475	375
240	-	-	480	380	560	440
300	-	-	555	435	645	510
400	-	-	-	-	770	605
500	-	-	-	-	880	690

Sé umhverfishitastig yfir 25°C, minnkar leyfilegt álag.

Tafla 7. Málgildleiki raftauga

Jafna fyrir spennufall í leiðara:

$$\text{Jafna 16} \quad \Delta U = \frac{\sqrt{3} * I * L * \text{COS}\varphi}{\lambda * A}$$

ΔU = spennufall í leiðara

I = straumur

L = lengd ájarðstreng

$\lambda = 1/\rho$ þar sem ρ er eðlisviðnám efnis, ál er 0,02864

$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ og 0,017241 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ fyrir kopar

A = þvermál leiðara í mm²

COS φ = fasvikstuðull rafals

Almennt er talið æskilegt að spennufall sé ekki meira en 6% af flutningsspennu. Ef spennufall er meira þarf annað hvort að velja sverari

streng eða breyta flutningsspennunni, þ.e.a.s. spenna hana upp og flytja á háspennu.

Ef umhverfishitastig hækkar, eykur það eðlisviðnám strengsins, og þá getur hann ekki flutt eins mikinn straum.

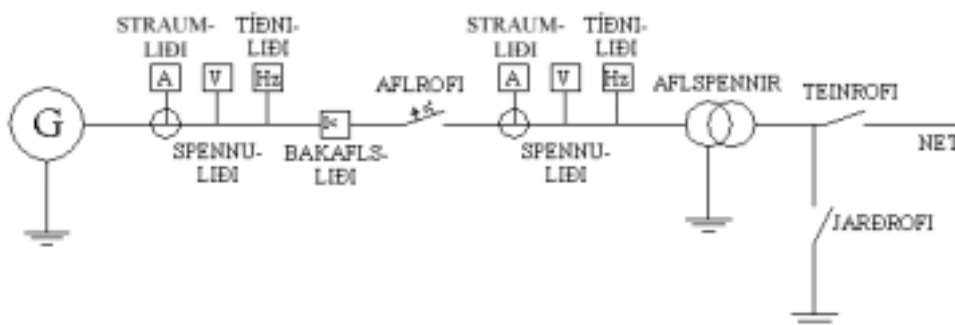
7.3.2 Varnarbúnaður

Nauðsynlegt er að nota varnarbúnað sem ver raforkuvirki fyrir ýmis konar truflunum og bilunum sem geta valdið skemmdum á búnaði.

Algengt er að varnarbúnaður sé liðastýring sem tengir saman alla skynjara sem tengdir eru virkjuninni. Hægt er að láta kerfið gefa aðvaranir ef eitthvað er í ólagi og leysa út ef bilun verður.

Nýjustu gerðir varnarbúnaða eru iðntölvur sem búið er að forrita með öllum þeim vörnum sem nauðsynlegar eru. Allur neyðarstöðvunarbúnaður skal vera harðviraður fyrir utan iðntölvuna vegna þess að ef tölvan bilar er ekki tryggt að hægt sé að grípa fram fyrir tölvuna. Nauðsynlegt er að tryggja varaafli fyrir tölvubúnaðinn og allan þann öryggisbúnað sem þarf spennu.

Nauðsynlegt er að koma upp skráningarkerfi. Skráningarkerfið getur verið sjálfvirkt eða framkvæmt af þeim sem sér um reksturinn. Skráðar eru niðurstöður mælinga um breytingar á orkuframleiðslu.



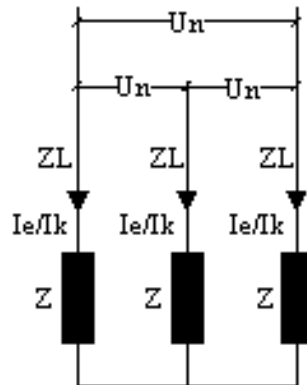
Mynd 36. Varnabúnaður

7.3.3 Yfirálags- og skammhlaupsvarnir

Við skipulagningu á raforkukerfi er mikilvægt að velja alla hluti sem tengjast kerfinu miðað við kröfur um yfirálags- og skammhlaupsvarnir. Sé það ekki gert getur slíkt kerfi orðið hættulegt og valdið tjóni. Þess vegna eru settar reglur af hálfu Löggildingarstofu.

Við skammhlaup í rafölum myndast í upphafi lágt byrjunarviðnám X_d' , sem vex fljótt upp í hið vanalega spanviðnám X_d . Í útreikningum á skammhlaupi er aðeins notað upphafsspanviðnámið X_d' . Þetta er til að fá fram hina miklu skammhlaupsstrauma, sem krefjast mjög stuttra útsláttartíma.

Stærð stuðstraumsins I_s ræðst af fasvikinu á bilunarstaðnum, eða (ómskaviðnámi/spanviðnámi) kerfisins.



Mynd 37. Þriggjafasa kerfi

U_n = netspenna (400V)

Z_L = viðnám kerfisins (háspennukerfis, spenna og lagna)

Z = rekstrarviðnám

I_e = fasastraumur

I_k = skammhlaupsstraumur

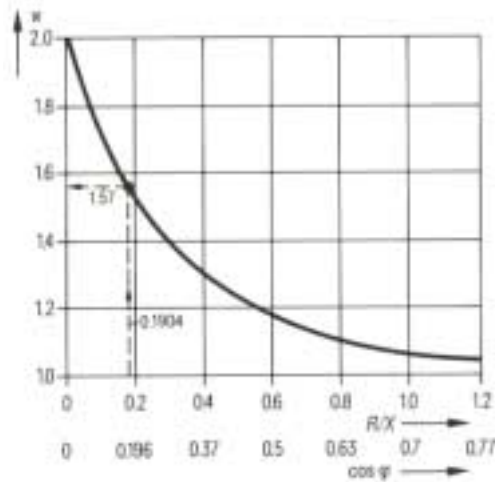
Jafna fyrir stærsta mögulega stuðstraum:

Jafna 17 $I_s = \chi \cdot \sqrt{2} I_k''$

I_s = stærsti mögulegi stuðstraumur

χ = stuðfaktor

I_k'' = stærsta gildi skammhlaupsstraums



Línurit 1. Stuðstraumsstuðull

Jafna fyrir fasastraum:

Í þriggja fasa kerfi er fasastraumurinn I_e

$$\text{Jafna 18} \quad I_e = \frac{U_n}{\sqrt{3} * (Z_L + Z)}$$

U_n = netspenna (t.d. 400V)

Z_L = viðnám kerfis (háspennukerfis, spenna og raflagna)

Z = rekstrarviðnám

Við skammhlaup í þriggja fasa kerfi er skammhlaupsstraumurinn I_k :

Jafna fyrir skammhlaupsstraum:

$$\text{Jafna 19} \quad I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_L}$$

Skammhlaup geta verið á nokkra vegu og versta tilfalli er 3ja fasa skammhlaup. Önnur tilfalli eru 2ja fasa skammhlaup, milli 2ja fasa og jarðar, milli fasa og jarðar og 2ja fasa jarðbilun.

Þegar verið er að hanna raforkukerfi og velja búnað er látið nægja að reikna út þriggjafasa skammhlaup vegna þess að það er mesta mögulega skammhlaup. Minnsti skammhlaupsstraumur skiptir líka máli því varnir þurfa að leysa örugglega út, einnig við minnsta skammhlaupsstraum.

Mesti skammhlaupsstraumurinn er nærri rafölum og deyfist eftir því sem bilunin verður lengra frá.

7.4 Tenging við netið

Frumskilyrði fyrir tengingu við net er að netið sé nægilega sterkt til að taka við framleiðsluafli virkjunar.

Tenging virkjunarinnar við netið getur verið mismunandi eftir stærð og gerð netsins á hverjum stað fyrir sig. Löggildingarstofa setur skilyrði um það hvernig gengið er frá tengingu virkjana við netið. Að auki ræður rafveitan, á því svæði sem virkjað er, hvort og hvernig virkjunin er tengd inn á netið. Netið er í dag í eigu rafveitna vítt og breytt um landið.

Dreifikerfið í sveitum er að mestu leyti 11000 V, annað hvort þriggja fasa eða eins fasa. Dreifikerfi RARIK er ca. 8000 km. dreift um næstum allt land þar af ca. 6000 km. í dreifilínunum (sjá viðauka, Raforkukerfi Íslands).

Ef rafkerfið er eins fasa er tæknilega séð ekkert því til fyrirstöðu að tengja eins fasa rafal við netið. Stærðatakmarkanir eru á því hvað netið getur tekið við mikilli orku og einnig er takmörkuð orka sem millispennar taka við. Kostnaður við einfasa kerfi er meiri vegna þess að allur ein fasa búnaður er mun dýrari en þriggja fasa og ekki eins hagkvæmur vegna meira taps í búnaði. Til að tengjast við netið sem er háspennt þarf oftast að spenna upp spennuna, þar sem rafalar í smávirkjunum eru í flestum tilvikum 400 V á milli fasa. Stærð spenna fer eftir stærð virkjana. Hægt er að nota sömu spenna og eru notaðir fyrir býli, ef heimtaug og spennir er nægilega stór. Flestir spennar til sveita eru 25kVA. Ef framleiðslan er meiri og býlið hefur ekki verið tengt við netið áður þarf að setja upp nýja spenna sem hæfa orkuframleiðslu virkjunarinnar. Tenging við dreifikerfi rafveitu er háð stærð rafals og aðstæðum á hverjum stað.

7.4.1 Nefnd raforkubænda, RARIK og Löggildingarstofu

Nefnd raforkubænda, RARIK og Löggildingarstofu hafa sett saman Leiðbeiningar vegna rekstrar- og rafmagnsöryggis við undirbúning tenginga smávirkjana við dreifikerfi rafveitna.

Í leiðbeiningunum eru smávirkjanir skilgreindar sem raforkuvirki með rafal á bilinu 0-300 kVA.

Þar segir að þeir sem hafa í huga uppsetningu smávirkjunar til tengingar inn á dreifikerfi rafveitu verða að hefja samstarf við viðkomandi rafveitu strax. Það er því rafveitan sem ræður hvort virkjanir geti tengst raforkukerfinu. Í leiðbeiningunum er fjallað um tegundir rafala sem eru helst notaðir í smávirkjunum.

Þar segir einnig að smávirkjanir þurfi að uppfylla sömu kröfur um öryggisþætti og gerðar eru til raforkuvirkja samkvæmt reglugerð um raforkuvirki.

Í leiðbeiningunum er einnig fjallað um samskipti við rafveitu. Þar segir að mismunandi varnaráðstafanir gildi fyrir samfasa rafal og ósamfasa rafal.

Samfasa rafall þarf að hafa samfösunarbúnað til að geta tengst netinu. Einnig þarf að vera tryggt að rafallinn framleiði ekki rafmagn inn á netið þegar netið hefur leyst út til að verja starfsmenn veitunnar sem gætu þurft að vinna við lagfæringar á netinu. Setja verður upp nauðsynlegar varnir til að kerfið bregðist við truflunum eins og t.d. vegna yfirstraums, skammhlaups, jarðhlaups, tíðnisveiflna, yfirspennu og undirspennu.

Ósamfasa rafall er háður nettengingu fyrir segulmögnun. Hann dettur því út þegar netið leysir út. Fyrir veituna er ósamfasa rafall eins og mótur af sömu stærð. Ósamfasa rafall má ekki koma aftur inn fyrir en eftir 20 mín. frá því netið kom aftur inn.

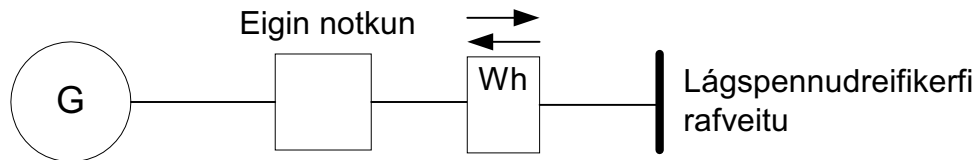
Ganga þarf frá samrekstrasamningi milli rafveitu og ábyrgðarmanns virkjunarinnar.

Tenging við dreifikerfi rafveitu er háð stærð rafalsins og aðstæðum á hverjum stað. Tenging 25kVA rafals beint inn á netið er í flestum tilfellum án erfiðleika svo framarlega sem öryggisþættir séu hafðir í heiðri. Tenging stærri rafals er háð ástandi netsins á hverjum stað. Ef þörf er á styrkingu netsins til að taka við raforkuframleiðslu smávirkjunarinnar er það alfarið á kostnað virkjunaraðila.

Gefnir eru eftirfarandi möguleikar á tengingu smávirkjana inn á dreifikerfi rafveitunnar en sú leið sem valin er, er háð samþykki rafveitunnar.

Dæmi 1:

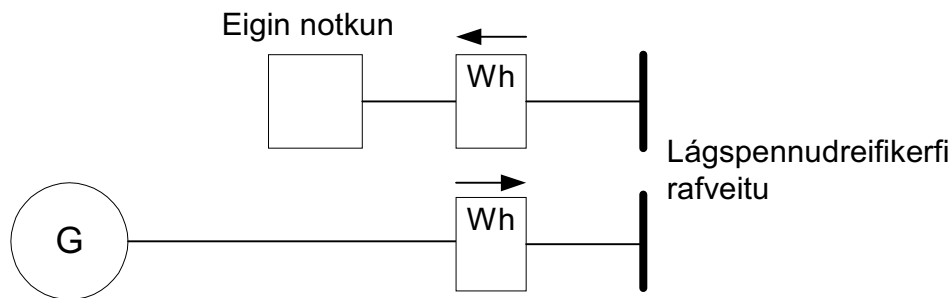
Rafallinn er tengdur húsveitu eiganda. Eigandinn vill selja veitunni það sem umfram er, og kaupa frá veitunni ef framleiðslan annar ekki þörf.



Mynd 38. Tenging við net í gegnum húsveitu

Dæmi 2:

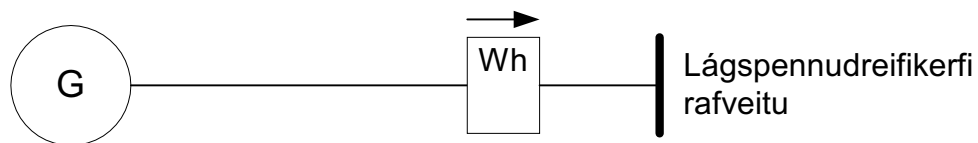
Rafallinn er tengdur netinu annars staðar en eigandinn tengist netinu. Gæti allt eins verið tengt annarri spennistöð. Eigandi selur alla framleiðslu til veitunnar og kaupir það sem hann þarfnast.



Mynd 39. Beintenging virkjunar við net

Dæmi 3:

Rafallinn er tengdur lágspennudreifikerfi veitunnar sem kaupir alla framleiðsluna.



Mynd 40. Beintenging virkjunar við net

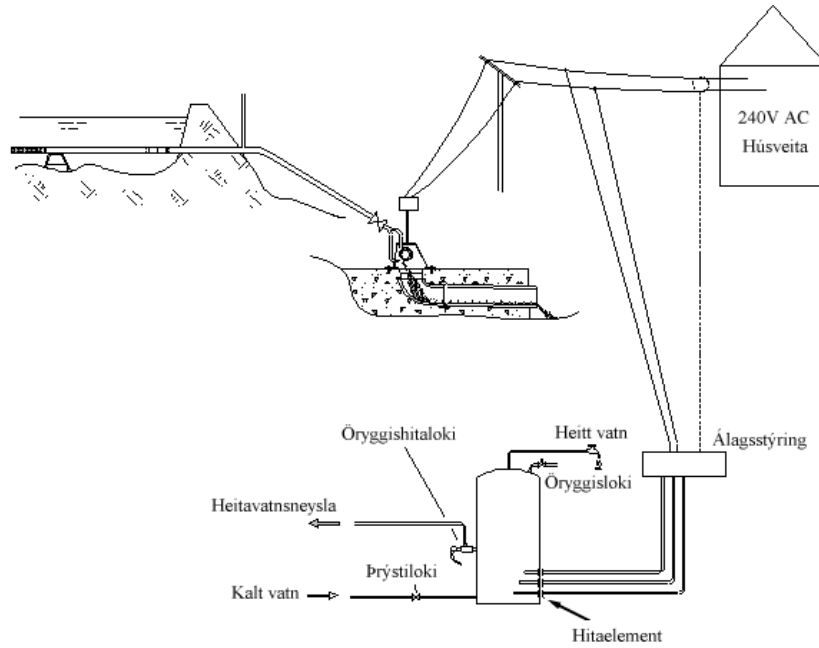
Þeir sem huga að virkjun er bent á að tryggja sér eintak af leiðbeiningunum.

7.5 Hraðastýringar

Túrbínur eru hannaðar fyrir ákveðna fallhæð og rennslismagn til að ná ákveðnum snúningshraða á túrbínuna, sem er síðan haldið stöðugum. Allt frávik frá snúningshraða er leiðrétt með hreyfanlegum stýribúnaði eða leiðarskóflum, sem stjórnast af gangráði sem stýrir vatnsmagni inn á túrbínur. Einnig er hægt að halda snúningshraðanum jöfnum með álagsstýringu.

7.5.1 Álagsstýring

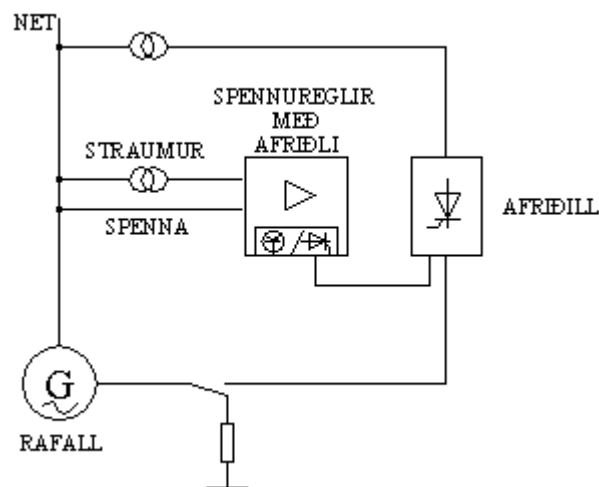
Þegar túrbína breytir snúningshraða vegna breytinga á álagi verður breyting á tíðni framleiðsluspennu. Álagsstýring er rofabúnaður sem stýrir álagi rafalans á þann hátt að þegar tíðni rafals breytist þá setur stýringin inn/út hitaelement og heldur þannig álaginu stöðugu. Álagsstýringar eru eingöngu notaðar við sjálfstætt net og gera gangráð óþarfan. Hægt er að fá álagsstýringar með mismunandi fjölda rása, sem þýðir að álagsstýringin hefur mismarga útganga sem elementum er raðað á. Elementin eru sett inn eftir álagsnotkun og halda stöðugu álagi á veitunni. Hentugt er að hafa stærð elementanna minni en 1-1,5 KW, annars getur myndast flökt á spennu kerfisins. Hægt er að nota elementin til að hita vatn og nýta þannig alla orku sem virkjunin býr yfir. Ef álagsstýring er notuð eingöngu er nauðsynlegt að hafa yfirhraðavörn til að verja rafalinn og annan vélbúnað fyrir yfirhraða. Ástæðan fyrir þessu er sú að túrbínur í lausagangi ná snúningshraða sem er um það bil tvisvar sinnum snúningshraðinn við eðlilega lestun. Ekki er nauðsynlegt að staðsetja álagsstýringuna í stöðvarhúsinu, hún getur verið hvar sem er í kerfinu.



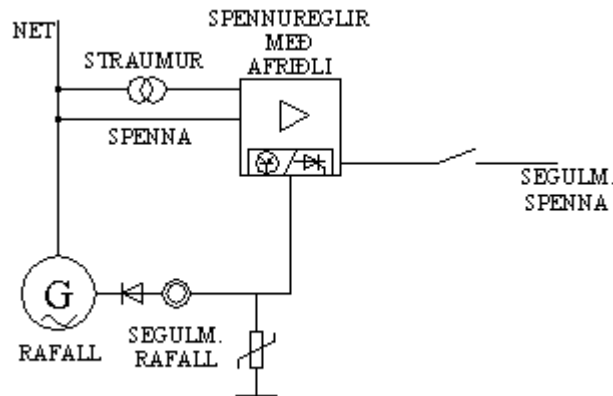
Mynd 41. Álagsstýring

7.5.2 Spennustýring

Spennustýring er mikið notuð á samfasa rafala. Stýringin er rafeindastýring sem fylgist með spennu rafalsins og stjórnar segulmögnunarstraum hans. Ef spenna rafalsins lækkar eykur stýringin segulmögnunarstrauminn. Bæði er hægt að fá stýringar sem stýra segulmögnun rafals og týristorum sem afriða spennuna.



Mynd 42. Spennureglir með afriðli

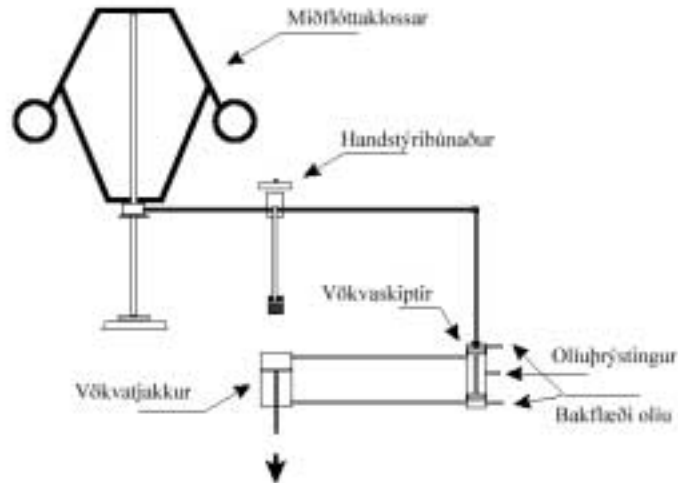


Mynd 43. Spennureglir með segulmögnunar rafall

7.5.3 Gangráðar

Gangráður er búnaður sem skynjar breytingar á snúningshraða túrbínu. Þegar túrbínan hægir eða hraðar á sér vegna álagsbreytinga af netinu, skynjar gangráðurinn breytinguna, og stýrir vatnsflæðinu inn á túrbínuna. Snúningshraðinn helst þannig stöðugur.

Miðflóttaaflsgangráður er algengastur í smáum rafstöðvum. Hann eru oftast reimdrifinn við túrbínuna vegna þess hve mikið afl þarf til að framkvæma gangstillinguna. Í flestum tilvikum er notast við vökvakerfi. Miðflóttaklossar stjórna vökvaskipti sem deilir vökvanum í vökvatjakk sem stjórnar vökvanum inn á túrbínuna, eða hreyfir bunuskera á bunutúrbínunum. Í sumum túrbínunum er miðflóttaaflað notað beint á bunuskera í bunutúrbínunum. Slíkt fyrirkomulag gerir gangstillinguna örugga en ekki mjög nákvæma.



Mynd 44. Miðflótttaafgangráður

7.5.4 Hraðastýring ósamfasa rafall

Ósamfasa rafall sem er tengdur inn á sterkt net, en þar fær hann segulmögnunarstrauminn, þarf ekki hraðastýringu. Ástæðan er sú að tíðni rafals stjórnast frá netinu sem heldur snúningshraðanum stöðugum.

Ef rafallinn er aftengdur frá netinu fellur álagið og túrbínan nær lausagangshraðanum. Lausagangshraðinn getur verið allt að 2–3 sinnum snúningshraðinn undir eðlilegu álagi. Þetta er slæmt fyrir rafal og gírunarbúnað vegna meiri áraunar. Í slíku tilfalli er nauðsynlegt að loka fyrir vatnsstreymið til túrbínunnar, en það verður að gerast hægt til að koma í veg fyrir höggbylgju.

7.5.5 Svinghjólíð

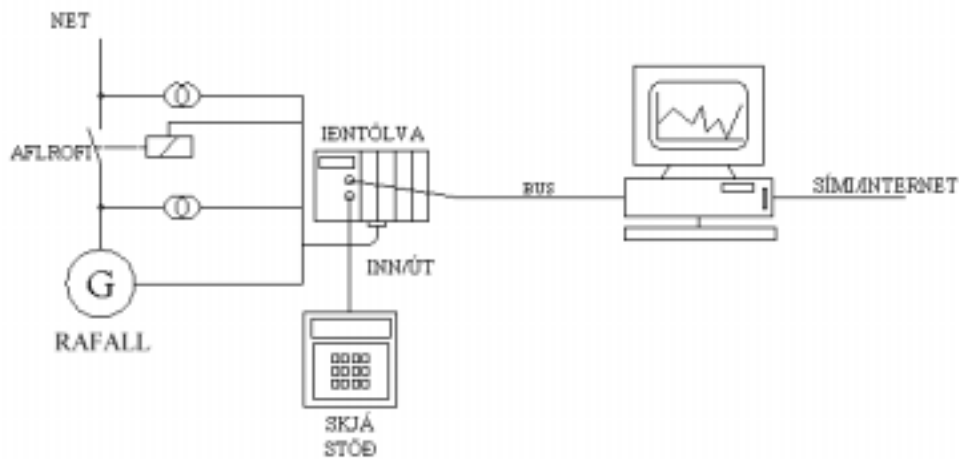
Til að tryggja að snúningur túrbínu flökti sem minnst, er svinghjólíð komið fyrir á öxul túrbínunnar. Með þessu er skriðþunginn í hjólinu notaður til að jafna út hraðabreytingar sem annars eiga sér stað.

7.6 Fjarstýringar

Fjarstýringar eru notaðar til að þeir sem hafa umsjón með virksjuninni geti fylgst með rekstri hennar án þess að vera á staðnum. Notaðar eru iðntölvur sem hægt er að tengja við internetið. Iðntölvun er tengd nemum sem fylgjast

með virkjuninni. Til eru margar gerðir af nemum sem nema nánast allt sem tengist virkjuninni, frá vatnshæð í lóni til orkuframleiðslu. Skjástýrikerfi eru tengd við iðntölvuna. Í skjástýrikerfum er hægt að koma fyrir öllum aðgerðum sem iðntölvun vinnur með. Koma þarf upp fiktvörn til að óviðkomandi fikti ekki í stýrikerfinu.

Hægt er að láta iðntölvuna senda smáskilaboð í farsíma (SMS) og láta umsjónarmann vita um ástand virkjunarinnar.



Mynd 45. Fjarstýring með iðntölvu

8 Kostnaðarútreikningar og fjármögnun

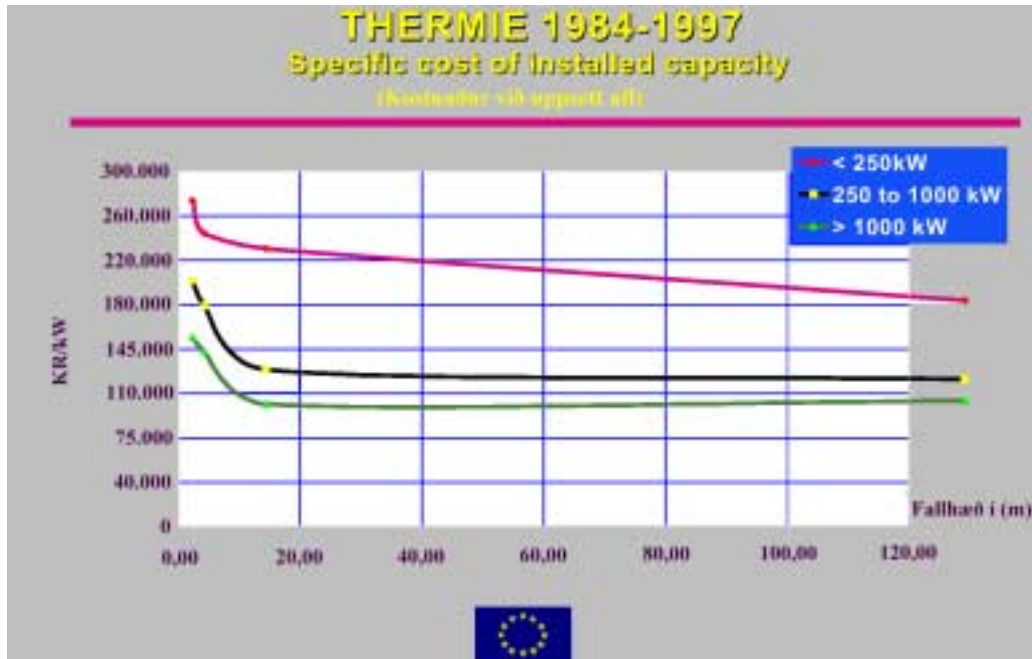
Áður en hafist er handa við framkvæmdir virkjunar verða kostnaðarútreikningar að liggja fyrir. Kostnaður er misjafn eftir aðstæðum á hverjum stað og oft er erfitt að gera sér grein fyrir því í hverju kostnaðurinn liggur. Best er að ráðfæra sig við sérfræðinga sem hafa sérhæft sig á þessu sviði, þ.e. einstaklinga eða tæknimenn sem hafa staðið í framkvæmdum.

8.1 Kostnaðarútreikningar

Kostnaður við virkjun er misjafn. Hann fer m.a. eftir gæðum búnaðar og mannvirkja. Hægt er að fá staðlaðan búnað sem er ódýrari en sérsníðaður búnaður. Ef nýta á vatnið og fallhæðina sem best er nauðsynlegt að undirbúningur sé nákvæmur. Fjárfestingakostnaður við vatnsaflsvirkjanir er meiri en við gas- og kolaorkuver en þau eru mikið notuð í Evrópu. Rekstarkostnaður við gas- og kolaorkuver er meiri en við vatnsaflsvirkjanir vegna eldsneytiskaupa.

Fjárfestingakostnaður virkjana með sama afl, eykst með minnkandi fallhæð. Draga má verulega úr fjárfestingakostnaði ef hægt er að nota gömul mannvirki s.s. stíflur og stöðvarhús. Einnig skal bent á að víða er til notaður búnaður sem hægt er að notast við. Slíkt verður að skoða í hverju tilfalli fyrir sig.

Í bókum og ritum eru oft uppgæfnar tölur sem sýna fjárfestingakostnað fyrir hvert framleitt kílóvatt. Þessar tölur eru reynslutölur úr mismunandi virkjunum. Ekki er hægt að nota þessar tölur nema til gróflegrar áætlunar, því engin virkjun er eins. Dæmi um slíka töflu er gefið hér á eftir. Athuga þó að taflan er gefin út af Evrópusambandinu miðað við reynslutölur á svæði Evrópska Efnahagsbandalagsins. Taflan er birt miðað við íslenskar krónur.



Mynd 46. EU kostnaður á kW

8.2 Sundurliðun kostnaðar

Við útreikninga þarf að gera ráð fyrir kostnaði við m.a.: jarðvinnu, stíflu, botnloku, inntaksrist, pípu, lofttúðu pípu, pípusamsetninga, pípuloka, undirstöður pípu, stöðvarhús, túrbínu, frárennsli, rafals, stýribúnaðar, tengibúnaðar, töfluskáps, raflagna, jarðstrengs, og vinnu við uppsetningu. Einnig þarf að taka tillit til hönnunarkostnaðar og mælinga.

8.3 Orkuverð

Erfitt er að segja til um hvaða verð rafveitur eru tilbúnar til að greiða fyrir raforku. Ekki er til gjaldskrá rafveitna fyrir orkukaup. Talað er um að þeir sem ætla að tengjast við netið greiði fast tengi-, flutnings- og aflgjald fyrir hverja innsetta kWst. Einnig er hugsanlegt að greiða þurfi refsigjald fyrir þann tíma sem virkjunin er ekki tengd netinu.

Verð sem talað hefur verið um er allt frá 1,18 kr/kWst á sumartaxta upp í 2,36 kr/kWst. á vetrartaxta.

Orkuverð sem sveitabýli greiða eru almennt út frá marktaxta. Ef farið er umfram aflið er greitt refsigjald.

Tafla 8 sýnir aflmælingu fyrir sveitabýli með rafhitun. Ekki er gert ráð fyrir umframnotkunotkun sem er 7,19 kr. kWst. Meðalnotkun er um 60 % á ári.

Toppur kW.	Meðalnotk.	kWst	Aflgjald á ári	Fasta gjald	Verð á ári	Raunverð á kWst.
6	3,6	3,91 kr.	44.580 kr.	12.980 kr.	131.453 kr.	6,95 kr.
8	4,8	3,91 kr.	59.440 kr.	12.980 kr.	170.975 kr.	6,78 kr.
10	6	3,91 kr.	74.300 kr.	12.980 kr.	210.496 kr.	6,67 kr.
12	7,2	3,91 kr.	89.160 kr.	12.980 kr.	250.017 kr.	6,61 kr.
15	9	3,91 kr.	111.450 kr.	12.980 kr.	309.299 kr.	6,54 kr.

Tafla 8. Marktaxti fyrir sveitabýli

Tafla 9 og 10 eru birtar sem hugmyndir að orkuverði, án ábyrgðar.

Gjöld		
Tengigjald á mán	3.250 kr.	-
Aflgjald á mán.	200 kr.	pr.kW
Flutningsgjald	0,16 kr.	pr.kW
Launafl	0,8 kr.	kvar

Tafla 9. Orkugjöld

Tekjur		
Sumar taxti mai - sept.	1,18 kr.	kWst
Vetrar taxti okt - apríl.	2,36 kr.	kWst
Meðal verð á ári.- flutnk.	1,70 kr.	kWst

Tafla 10. Orkutekjur

8.4 Verðhugmyndir

Í þessum kafla eru gefnar verðhugmyndir af þeim þáttum sem lúta að virkjunarframkvæmd. Verðin eru smásöluverð frá framleiðendum og innflytjendum. Alltaf er hægt að leita eftir tilboðum og fá þannig hagstæðari verð. Þessi kafla er ekki tæmandi vegna sérstöðu hvernir virkjunar. Hægt er að útskýra margt með þessum verðhugmyndum og gera grein fyrir kostnaði

virkJunarframkvæmda. Best er að gera sér grein fyrir kostnaðinum með því að taka dæmi.

Dæmi 1:

50kW virkjun með Pelton túrbínu og ósamfasa rafal. Stífla virkjunar er steipt og pípa er 100 m. plastpípa 250 mm í þvermál. Fallhæð er 60 m. og vatnsrennsli er 100 l/s. Lengd jarðstrengs er 1 km.

Dæmi 2:

50kW virkjun með Francis túrbínu og ósamfasa rafal. Stífla virkjunar er steipt og pípa er 50 m. plastpípa 560 mm í þvermál. Fallhæð er 10 m. Vatnsrennsli er 500 l/s. Lengd jarðstrengs er 1 km.

Búnaður og mannvirki	KR
Stýfla	1.000.000
Pípa	500.000
Stöðvarhús	1.000.000
Túrbína	1.200.000
Stýribúnaður	150.000
Rafali	180.000
Töflubúnaður	100.000
Jarðstrengur	1.200.000
Spennir	250.000
Vinna við uppsetn.	2.790.000
Hönnunar kostn.	1.116.000
Samtals	9.486.000
Kostn pr. kW.	189.720

Tafla 11. Dæmi 1

Búnaður og mannvirki	KR
Stýfla	1.200.000
Pípa	1.200.000
Söðvarhús	1.000.000
Túrbína	1.700.000
Stýribúnaður	150.000
Rafali	180.000
Töflubúnaður	100.000
Jarðstrengur	1.200.000
Spennir	250.000
Vinna við uppsetn.	3.490.000
Hönnunar kostn.	1.396.000
Samtals	11.866.000
Kostn pr. kW	237.320

Tafla 12. Dæmi 2

Í dæmi 1 er kostnaður á hvert kW 189.720 kr. og í dæmi 2 er kostnaður á hvert kW 237.320 kr. Þegar þessi dæmi eru skoðuð nánar sést að meiri kostnaður fylgir virkjun sem hefur minni fallhæð.

Taflan 13 gefur dæmi um tekjur af sölu inn á dreifikerfið. Miðað er við gefnar orkuverðs forsendur og nýtingartími virkjunar er 83% sem getur verið breytilegt eftir virkjunum.

Orkusala kW	kWst á ári	kWst meðalv - flutnkostn	Samtals.	Tengi og aflgjöld	Tekjur	Tekjur /kWst
5	36.350	1,70 kr.	61.795 kr.	51.004 kr.	10.791 kr.	0,30 kr.
10	72.700	1,70 kr.	123.590 kr.	63.007 kr.	60.583 kr.	0,83 kr.
15	109.050	1,70 kr.	185.385 kr.	75.011 kr.	110.374 kr.	1,01 kr.
20	145.400	1,70 kr.	247.180 kr.	87.014 kr.	160.166 kr.	1,10 kr.
25	181.750	1,70 kr.	308.975 kr.	99.018 kr.	209.957 kr.	1,16 kr.
30	218.100	1,70 kr.	370.770 kr.	111.022 kr.	259.748 kr.	1,19 kr.
40	290.800	1,70 kr.	494.360 kr.	135.029 kr.	359.331 kr.	1,24 kr.
50	363.500	1,70 kr.	617.950 kr.	159.036 kr.	458.914 kr.	1,26 kr.
60	436.200	1,70 kr.	741.540 kr.	183.043 kr.	558.497 kr.	1,28 kr.
70	508.900	1,70 kr.	865.130 kr.	207.050 kr.	658.080 kr.	1,29 kr.
80	581.600	1,70 kr.	988.720 kr.	231.058 kr.	757.662 kr.	1,30 kr.
90	654.300	1,70 kr.	1.112.310 kr.	255.065 kr.	857.245 kr.	1,31 kr.
100	727.000	1,70 kr.	1.235.900 kr.	279.072 kr.	956.828 kr.	1,32 kr.
150	1.090.500	1,70 kr.	1.853.850 kr.	399.108 kr.	1.454.742 kr.	1,33 kr.
200	1.454.000	1,70 kr.	2.471.800 kr.	519.144 kr.	1.952.656 kr.	1,34 kr.

Tafla 13. Tekjur miðað við selt afl

Verð á kWst er meðalverð að frádregnum flutningskostnaði, og tengi- og aflgjöld eru miðuð við töflu 9 og 10. Reiknað er með fasviki, $\cos \varphi = 0,9$.

Miðað við mismun á keyptri og seldri orku er ljóst að mesti hagnaður er í framleiðslu til eigin nota.

8.5 Fjármögnun

Fjármögnunarmöguleikar þeirra sem hafa hug á að virkja eru fjölmargir. Bændur geta fengið lán úr sjóðum landbúnaðarins. Æskilegt er að þeir sem ætla út í virkjunarframkvæmdir geti staðið undir allt að 25-30% af stofnfé virkjunarinnar. Það getur verið í formi smíðavinnu, vélavinnu o.s.frv.

Framleiðnisjóður veitir styrk til atvinnusköpunar sem bændur á bújörðum standa fyrir, í stað eða til viðbótar framleiðslu í hefðbundnum búgreinum. Hver bújörð getur átt kost á óafturkræfu framlagi allt að 1500 þús. kr., en aldrei meira en sem nemur 30% af heildarframkvæmdakostnaði.

Lánasjóður Landbúnaðarins hefur ekki lánað til virkjanaframkvæmda enn sem komið er, en hann telur ekkert því til fyrirstöðu að veita lán ef fullgild umsókn berst. Í drögum að úthlutunarreglum næsta árs er gert ráð fyrir sérstökum lánaflökki fyrir virkjanir sem gera ráð fyrir sölu á markað. Að sögn

lánasjóðsins mun hann veita verðtrygð lán til 40 ára með 6,5% vöxtum. Lánað er allt að 50% af stofnkostnaði. Ef stjórnvöld sjá sér fært að tryggja bændum sömu kjör og bændur fá til uppbyggingar á öðrum mannvirkjum, væru lán til a.m.k. 30-40 ára með 3% vöxtum.

Byggðastofnun hefur styrkt bændur á undanförunum árum til uppbyggingar vatnaflsvirkjana. Lánveitingar stofnunarinnar eru eftir sömu reglum og önnur atvinnustarfsemi á landsbyggðinni. Lánshlutfall er allt að 75% af framkvæmdakostnaði á 7% vöxtum.

Viðskiptabankar hafa misjöfn kjör og hvert verkefni þarf að skoða fyrir sig. Ekki eru lán bankanna talin eins hagstæð og lán annarra lánastofna.

Fjármögnunarfyrirtæki hafa sérhæft sig í kaupum á vélum og tækjum s.s. Glitnir hf, SP-fjármögnun, Lýsing hf. o.fl. Lán sem þessi fyrirtæki veita eru almennt til skamms tíma og á háum vöxtum. Því koma þessi lán varla til greina.

Aðrir: Hugsanlegt er að fá aðra fjárfesta s.s. Atvinnuþróunarsjóði og Orkusjóð. Einnig er hugsanlegt að fyrirtæki taki að sér bæði fjármögnun og byggingu virkjunar.

8.6 Arðsemisútreikningar

Arðsemisútreikninga virkjana er hægt að gera þegar búið er að reikna út kostnað virkjunar og tekjur af framleiðslu. Einnig þurfa upplýsingar um lánakjör að vera ljós.

Dæmi:

Arðsemi virkjunarinnar er reiknuð út frá dæmi 1.

Búnaður og mannvirki	KR
Stýfla	1.000.000
Pípa	500.000
Stöðvarhús	1.000.000
Túrbína	1.200.000
Stýribúnaður	150.000
Rafali	180.000
Töflubúnaður	100.000
Jarðstrengur	1.200.000
Spennir	250.000
Vinna við uppsetn.	2.790.000
Hönnunar kostn.	1.116.000
Samtals	9.486.000
Kostn pr. kW.	189.720

Tafla 14. Kostnaður (sjá töflu 11 kafla 8.4)

Heildarkostnaður virkjunar er u.þ.b. 9,5 milljónir kr. Framleiðnisjóður Landbúnaðarins veitir 1,5 milljóna kr. styrk. Lán tekið frá Lánasjóði Landbúnaðarins sem er 50% af virkjunarkostnaði á 6,5% vöxtum. Lánið er til 40 ára. Vinna eiganda er helmingur af heildarvinnu eða 1,4 milljónir kr. og hann þarf að leggja til 1,8 milljónir kr. í lausafé. Miðað er við að eigandinn noti 10 kW og selji 40 kW inn á netið.

Arðsemisútreikingur	
Tekjur af sölu	359.331 kr.
Arðsemi af eigin notkun	210.496 kr.
Arðsemi + tekjur - rekstrarkostnaður	380.107 kr.
Lánsupphæð 50% til 40 ára	4.743.000 kr.
Vextir	6,80%
Afborganir á ári	347.536 kr.
Afkoma á ári	32.571 kr.
Eigið fé + eigin vinna + styrkur	4.743.000 kr.

Tafla 15. Arðsemi

Ef miðað er við að arðsemi af eigin notkun og tekjur af sölu fari í að borga lánið þá borgar hún lánið upp á u.þ.b. 29 árum. Ekki er tekið tillit til þess hver arðsemin yrði ef eigið fé yrði varið í annað.

9 Reglur og reglugerðir

Lög og reglugerðir gilda um framleiðsla rafmagns, uppbyggingu og rekstur raforkuvera, sölu rafmagns og dreifingu. Í orkulögum stendur hverjir mega framleiða rafmagn. Um annað er fjallað í reglugerð um raforkuvirki, orðsendingum og verklagsreglun frá Löggildingarstofunni. Einng er bent á að hægt er að nálgast upplýsingar á heimasíðu Löggildingarstofu www.lis.is.

Rafveitur, sem tengst er við, ráða sjálfar hvort þær leyfa tengingu rafstöðvar við netið. Ef rafstöðin á að vera tengd inn á landsnetið verður alltaf ná samkomulagi við rafveitu áður en byrjað er að virkja.

9.1 Orkulög

Í öðrum kafla Orkulaga nr. 58/1967 [10. gr.] segir:

Til að reisa og reka raforkuver stærra en 2000 kW þarf leyfi Alþingis.

Til að reisa og reka raforkuver 200-2000 kW þarf leyfi ráðherra raforkumála.

Þá er heimilt að reisa og reka varastöð allt að 1000 kW án sérstaks leyfis.

Þeir, sem við gildistöku þessara laga hafa rétt til að eiga, reisa eða reka raforkuver, halda þeim rétti áfram.

Í [11. gr.] segir:

Umsóknir um leyfi til að reisa og reka raforkuver eða stækka skulu sendar ráðherra raforkumála, ásamt uppdráttum, kostnaðar- og rekstraráætlun hins fyrirhugaða raforkvers. Ráðherra sendir gögn þessi Orkustofnun til umsagnar, áður en hann afgreiðir málið endalega, eða fær það Alþingi til meðferðar.

[10. gr.] og [11. gr.] Orkulaga eru þær einu sem ná yfir smávirkjanir. Löggildingarstofa hefur úrskurðarvald um önnur reglugerðarræði.

Löggildingarstofa setur reglugerðir og hefur allt almennt eftirlit með virkjunum af þessu tagi.

Að sjálfsögðu er best að kynna sér öll þau lög og reglur sem gilda um smávirðjanir. Mikil ábyrgð hvílir á þeim sem eiga og annast einkarafstöðvar og er þeim bent á að tryggja sér eintak af Reglugerð um raforkuvirki, Orðsendingar Löggildingarstofu og Verklagsreglur um raforkuvirki.

9.2 Lög um öryggi raforkuvirkja, neysluveitna og raffanga

Lög nr. 146/1996 um öryggi raforkuvirkja, neysluveitna og raffanga. Í [1. gr.] laganna segir að tilgangur þeirra sé að draga sem mest úr hættu og tjóni af raforkuvirkjum, neysluveitum og rafföngum og truflunum af völdum starfsemi þeirra.

Í [3. gr.] laganna er skilgreining á raforkuvirki og einkarafstöð: „Raforkuvirki: Mannvirki og búnaður til vinnslu og dreifingar rafmagns“. „Einkarafstöð: Rafstöð í einkaeign sem er staðbundin og framleiðir rafmagn fyrir neysluveitu og fær ekki rafmagn frá rafveitu“.

Í lögnum er einnig fjallað um aðra þætti öryggis raforkuvirkja, neysluveitna og raffanga. Þar eru lög um rafmagnseftirlit, hlutverk Löggildingarstofu og um gjaldtöku til reksturs rafmagnsöryggismála sem Löggildingarstofu eru falin samkvæmt lögnum. Þar er einnig tekið á ýmsum ákvæðum ef ekki er farið að fyrirmælum Löggildingarstofu (sjá nánar lög um öryggi raforkuvirkja, neysluveitna og raffanga).

9.3 Reglugerð um raforkuvirki

Í reglugerð um raforkuvirki eru kaflar sem fjalla um reglur sem gilda fyrir uppsetningu raforkuvera. Einnig kemur fram hverjir mega annast rekstur og viðhald þeirra. Helstu kaflar sem eiga við um einkarafstöðvar eru kafli 1.4.3, kafli 1.5. og kafli 1.5.2. Einnig er fjallað um vélavirki í kafla 262.

Kafli 1.4.3 fjallar um ábyrgðarmann einkarafstöðva. Þar segir hvaða skilyrðum ábyrgðamaður þarf að uppfylla og gerður munur á því hvort rafmagnsframleiðslan er háspenna eða lágspenna.

Ef rafstöðin framleiðir og/eða dreifir háspennu þá þarf ábyrgðamaður að hafa A og eða A-C löggildingu.

Ef rafstöðin framleiðir og/eða dreifir lágspennu þá þarf ábyrgðamaður að hafa B og eða B-C löggildingu.

Kafli 1.5 fjallar um eftirlit með rafveitum, iðjuverum og einkarafstöðvum. Þar er fjallað um eftirlit með rafstöðvum og þau öryggisstjórnunarkerfi sem rekstraaðilar þurfa að koma sér upp til þess að fylgjast með ástandi og viðhaldi á stöðinni.

Kafli 1.5.2 fjallar um öryggisstjórnun. Í öryggisstjórnunarkerfi skal m.a. skilgreina eftirfarandi meginþætti:

- 1) Fastmótað skipulag og skilgreiningu á því hver beri ábyrgð á að nauðsynlegum öryggis- og fyrirbyggjandi aðgerðum ásamt eftirliti sé sinnt og hvernig ábyrgðamaðurinn dreifir ábyrgð á aðra starfsmenn.
- 2) Skráning á megineiningum raforkuvirkja og breytingum sem gerða eru.
- 3) Ákvæði um hvernig sé staðið að eftirliti með virkjum í rekstri, úttektum og skoðunum á nýjum virkjum og endurbótum eldri virkja.
- 4) Ákvæði um tíðni og umfang eftirlits.
- 5) Ákvæði um greinungu, skráningu og flokkun athugasemda auk þess hvernig bregðast skuli við athugasemdum.
- 6) Ákvæði um innri úttektir öryggisstjórnunarkerfisins.

Löggildingarstofu er heimilt að takmarka kröfur til einkarafstöðva við liði 1) og 2) þessarar greinar ef uppfyllt er krafa um heildarskoðun háspennuhluta við komandi virkis á minnst 5 ára fresti.

Eigandi einkarafstöðvar skal tilnefna ábyrgðarmann sem ber ábyrgð á því að unnið sé samkvæmt skilgreindu öryggisstjórnunarkerfi. Tilkynna skal Löggildingarstofu nafn og kunnáttu ábyrgðarmannsins sem uppfylla skal hæfniskröfur samkvæmt reglugerð. Ábyrgðarsvið hans skal vera skilgreint í öryggisstjórnunarkerfi einkarafstöðvarinnar (sjá nánar í Reglugerð um raforkuvirki kafla 1.5).

Kafli 262 fjallar um uppsetningu véla og frágang þeirra, kælingu rafala og frágang kælíbúnaðar. Einnig er fjallað um gæslu rafala. Þar er sagt að ef rafall er stærri en 25 kW, og ekki í stöðugri gæslu, skal tryggja það að spenna og tíðni haldist stöðug (sjá nánar Reglugerð um raforkuvirki).

Eftirlit með rafstöðvum er að hálfu Löggildingarstofu og felst m.a. í skoðun á öryggisstjórnunarkerfi og úrtaksskoðun nýrra og breyttra raforkuvirkja og raforkuvirkja í rekstri.

9.4 Orðsendingar Löggildingarstofu

Orðsending nr.1/84 fjallar um rekstur, eftirlit og viðhald raforkuvirkja. Orðsendingin er gefin út til nánari skilgreiningar á ákvæðum reglugerða. Þar er fjallað um nánari útfærslu reglugerðarinnar og hvernig umgangast skal rafstöðvar og hvaða öryggissjónarmiða skal gætt. Þar segir meðal annars að smávirðjanir í einkaeign skulu uppfylla ákvæði um rekstrastjórnun í köflum 4 og 5.

Kafli 4 fjallar um ábyrgðamann, ráðningu hans, hvaða skilyrðum hann þarf að fullnægja, hvernig vinnu hans skal háttað og samskiptum hans við aðrar rafveitur, ef um er að ræða samrekstur við aðra háspennuveitu (sjá nánar Orðsendingar frá Löggildingar stofu).

Kafli 5 fjallar um ábyrgð ábyrgðarmanns, aðgengi að rafstöðvum og rofabúnaði, rof á samtengingu við landsnetið og hættu fyrir menn og eignir og hvaða ráðstafanir er hægt að gera til að koma í veg fyrir hættu.

5.1.1. Ábyrgðamaður skal annast um að stöðvar og veituvirki séu rekin og þeim haldið við í samræmi við ákvæði Reglugerðar um raforkuvirki (sjá nánar Orðsendingar frá Löggildingarstofu).

Einnig er vert að athuga orðsetningu nr. 2/84 reglur um setningu háspennuvirkja.

9.5 Verklagsreglur Löggildingarstofu

Í verklagsreglum (VLR) Löggildingarstofu er að finna samantekt á reglugerðum sem eru fyrir rafverktaka og rafveitur. Í verklagsreglum fyrir rafveitur er að finna samantekt á reglugerðum sem ná yfir einkarafstöðvar.

VLR 1 fjallar um öryggisstjórnun rafveitna, iðjuvera og einkarafstöðva og þar er fjallað um öll atriði sem lúta að öryggisstjórnun.

VLR 2 er verklýsing á því hvernig best er að standa að mælingum í lágspennnum raforkuvirkjum.

VLR 3 er skoðun á öryggisstjórnunarkerfi rafveitna, iðjuvera og einkarafstöðva. Fjallað er um tilgang skoðunar á kerfinu, kröfur öryggisstjórnunarkerfa og hverjir framkvæma skoðun á öryggisstjórnunarkerfinu.

VLR 4 fjallar um vægi athugasemda vegna skoðunar virkja og öryggisstjórnunarkerfis rafveitna, iðjuvera og einkarafstöðva.

9.6 Byggingareglugerð

Í byggingareglugerð er fjallað um allt sem lítur að byggingum, svo sem hönnun og bygging þeirra. Eins og segir í byggingareglugerð nr. 441/1998 þá eru markmið hennar að tryggja að byggðar séu traustar og góðar byggingar í sátt og samlyndi við land og nábyggjendur.

Í 2. gr. er fjallað um gildissvið reglugerðarinnar. Þar er sagt að bygging virkjana og dreifikerfis sé undanþegin byggingareglugerð. Þrátt fyrir það þarf byggingarleyfi fyrir varanlegum húsbyggingum sem gerðar eru í tengslum við þessar framkvæmdir. Einnig þarf byggingarleyfi fyrir tengivirkjum.

Framkvæmdir sem eru undanþegar byggingaleyfum skulu vera í samræmi við skipulagsákvæði skv. III. kafla skipulagsbyggingarlaga. Óheimilt er að hefja framkvæmdir sem teljast meiri háttar, fyrr en fengist hefur framkvæmdaleyfi viðkomandi sveitastjórnar. Leiki vafi á að framkvæmd sé háð byggingarleyfi sker úrskurðarnefnd skipulagsbyggingarmála úr um það, sbr. gr. 10.

Í reglugerðinni eru ýmsar greinar sem fjalla um lánmarksákvæði sem uppfylla þarf við byggingar. Umhverfisráðherra getur veitt heimild til að vikið sé frá ákvæðum hennar. Einnig getur umhverfisráðherra gefið út sérstakar leiðbeiningar um túlkun á einstökum greinum reglugerðarinnar.

9.7 Lög um mat á umhverfisáhrifum

Lög nr. 106/2000 lögin fjalla um það hvenar skilt er að láta framkvæmdir í umhverfismat. Í viðauka 1 og 2 eru greinar sem lúta að virkjunarframkvæmdum.

1. viðauki. Framkvæmdir sem ávallt eru háðar mati á umhverfisáhrifum

17.gr. Stíflur og önnur mannvirki eða breytingar á árfarvegi til að hemja og/eða miðla vatni þar sem 3 km² lands eða meira fara undir vatn eða rúmtak vatns er meira en 10 milljónir m³.

2. viðauki. Framkvæmdir sem kunna að hafa í för með sér umtalsverð umhverfisáhrif og metið er í hverju tilviki með tilliti til eðlis, umfangs og staðsetningar hvort háðar skuli mati á umhverfisáhrifum samkvæmt lögum þessum, sbr. einnig 3. viðauka.

3.gr. Orkuiðnaður: a. Iðjuver til framleiðslu á rafmagni, gufu og heitu vatni, vatnsorkuver með uppsett raf afl 100 kW eða meira og varmavinnsla úr jarðhitasvæðum sem nemur 2.500 kW hráafli eða meira.

10 Lokaorð

Stöðugt vatnsrennsli og næg fallhæð er grundvöllur fyrir að arðbært sé að virkja. Ljóst er að eftir því sem fallhæð er meiri því minni er fjárfestingakostnaður á hvert kílóvatt.

Nauðsynlegt er að stærð mannvirkja, s.s. stíflu, pípu, stöðvarhús og túrbínu, séu í réttu hlutfalli vatnsrennsli og fallhæð.

Kanna þarf hvort mögulegt sé að tengja virkjunina við netið á þeim stað sem virkjunin er staðsett. Tenging við netið er í öllum tilvikum háð samþykki eiganda dreifikerfisins. Hagkvæmasti kosturinn er að nota ósamfasa rafall.

Skoða verður hagkvæmni hvernar virkjunar fyrir sig og meta þá hvort virkjunin sé arðbær.

Arnar Pálsson

Kristinn Steinn Traustason

11 Heimildaskrá

1. Clemen, D.M. 1999. *Hydro plant electrical systems*. Kansas City, HCI PUBLICATIONS.
2. Eggert Gautur Gunnarsson og Einar H. Ágústsson. 1991. *Rafmagnsfræði 2 fyrir framhaldsskóla*. Reykjavík, Vélskólaútgáfan.
3. Emery, D. R. og J. D. Tinnerty. 1997. *Corporate financial management*. New Jersey, THE DRYDEN PRESS
4. Fritz, Jack J. 1984. *Small and Mini Hydropower Systems*. USA, McGraw-Hill Book Company.
5. *Leiðbeiningar um smávirðjanir*. 2000. Tekið saman af nefnd raforkubænda, RARIK og Löggildingarstofu Íslands. [Óútgefið].
6. Monition, L., M. Le Nir og J. Roux. 1984. *Micro Hydroelectric Power Stations*. Paris, John Wiley and Sons.
7. Penche, Celso. 1998. *Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site*. Brussel, European Commission.
8. Sigurjón Rist. 1953. *Leiðbeiningar um mælingar á vatnsrennsli í smáám og lækjum*. Reykjavík, Raforkumálastjóri vatnsmælingar.
9. Þórður Runólfsson. 1952. *Vatnsvélafræði*. Reykjavík, [útgáfufyrirtæki vantar].

Lög og reglugerðir:

10. *Reglugerð um raforkuvirki*. 1971.
11. *Orðsendingar Löggildingarstofu nr. 1/1984*.
12. *Byggingarreglugerð nr. 441/1998*.
13. *Orkulög nr. 58/1967*.
14. *Lög um mat á umhverfisáhrifum nr. 106/2000*.

Önnur gögn:

Erindi frá námsstefnu um uppbyggingu og rekstur lítilla vatnsaflsvirkjana sem haldin var á Kirkjubæjarklaustri 8.-9. júní 2000.

15. Eiður Jónsson. 2000. *Námstefna Klaustri*.
16. Einar Pálsson. 2000. *Lítill orkuver. Fjármögnun v/ litilla orkuvera til sveita*.
17. Ólafur Árnason. 2000. *Uppbygging og rekstur lítilla vatnsaflsvirkjana nauðsynlegar forsendur og hönnun*.
18. Ævar Jóhannesson. 2000. *Tíðnistýrðar álagsstýringar*.

Munnlegar heimildir:

19. Eiður Jónsson (rafvirki og túrbínusmiður, Árteigi).
20. Guðjón Axel Guðjónsson (lögfræðingur í iðnaðar- og viðskiptaráðuneyti).
21. Guðmundur Guðmundsson (tæknifræðingur hjá RARIK).
22. Gunnar Hafsteinsson (stafsmaður Landsvirkjunar og áhugamaður um byggingu smávirðjana).
23. Lúðvík B. Ögmundsson (tæknifræðingur, VGK).
24. Ólafur Eggertsson (formaður raforkubænda, Þorvaldseyri).
25. Tryggvi Ásgrímsson (tæknifræðingur hjá RARIK).
26. Ásgeir Þór Ólafsson (tæknifræðingur hjá RARIK).
27. Kristinn Jóhannesson (sölstóri hjá Rönning).

Heimasíður

28. www.geocities.com
29. www.microhydro.com
30. www.hydro.com
31. www.tamar.com.au
32. www.cargo-kraft.se
33. www.smallhydropower.com